



Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde

Masterarbeit



Finite Elemente Simulationen als Beitrag
zur Optimierung einer Pfannenzustellung

Richard Kasper, BSc

September 2022



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 12.09.2022

Unterschrift Verfasser/in
Richard Kasper

Danksagung

An dieser Stelle gilt es, vielen Menschen und Wegbegleitern DANKE zu sagen. An erster Stelle möchte ich hier meinen Eltern Monika & Josef danken. Sie haben mich nicht nur finanziell unterstützt. In all meinem Tun konnte ich auf ihre bedingungslose Unterstützung zählen und sie haben mich immer mit bestem Wissen und Gewissen beraten und das Wohl meiner Geschwister und mir immer vor ihr eigenes gestellt. DANKE Mama & Papa!

Für die Momente, in denen es einmal nicht ganz so rund gelaufen ist oder wenn nach einem anstrengenden Tag einfach jemand zum Kopf abschalten gebraucht wurde, hat sich mein langjähriger Mitbewohner und Freund Patrick stets für ein gemeinsames Bier Zeit genommen. Auch dafür danke!

Meine Freundin Monika hat mich durch mein Masterstudium begleitet und auch sie war in den letzten Monaten immer mit einem offenen Ohr und seelischem Beistand für mich da, wenn ich es gebraucht habe. Danke Moni!

Meine Schwester Margarita hat sich ebenfalls einen Eintrag auf dieser Seite verdient. In mühsamer Arbeit hat sie diese Arbeit korrigiert und mich so vor Grammatik-Fehlern bewahrt. Auch meinem Bruder Georg möchte ich für das Korrekturlesen an seinem wohlverdienten Feierabend und am Wochenende danken. Danke Maga & Geggy!

Mein Bruder Manfred hat ebenfalls seinen Beitrag geleistet, indem er nichts getan hat. Er hat in keinsten Weise versucht mich am Arbeiten zu hindern oder meine Masterarbeit zu sabotieren. Mandi, ich weiß es ist dir schwergefallen. Danke Mandi!

Noch viele weitere Menschen haben die Zeit meines Studiums zu der schönsten Zeit meines Lebens gemacht. Sei es bei gemeinsamen Reisen oder beim Feiern von bestandenen Prüfungen. Ohne diese Freunde hätten sich im Laufe des Studiums niemals so viele unvergessliche Momente angesammelt, an die ich gerne zurückdenke.

Doch nicht nur im privaten Bereich gibt es Menschen, denen ich zu danken habe. Durch das gefühlte unendliche Fachwissen von Professor Harmuth konnte ich das nötige Know-How ansammeln, auf dem sich mein weiteres Berufsleben stützen wird. Dr. Gruber hat mich bei meiner Masterarbeit unterstützt und konnte mir in spannenden Vorlesungen ebenfalls eine Unmenge an Fachwissen vermitteln. Und natürlich gilt es auch Diplomingenieur Maximilian Klopff zu danken. Bei auch noch so trivialen Fragen nahm er sich immer die Zeit, mir diese nach bestem Wissen und Gewissen zu beantworten. Dank seiner Geduld und Kompetenz war es mir erst möglich, diese Masterarbeit zu beenden. Danke Max!

Und zu guter Letzt gilt es auch noch Dank an meine Kaffeemaschine auszusprechen, die mir beim Lernen für Prüfungen und langen Tagen und Nächten beim Erstellen dieser Arbeit stets treue Dienste erwiesen hat.

Kurzfassung

Die Stahlpfanne ist ein wesentlicher Teil der Stahlproduktion, sowohl als Transportbehälter für Flüssigstahl als auch als Aggregat in der Sekundärmetallurgie und ist darüber hinaus der größte Feuerfestverbraucher pro Tonne Stahl in einem Stahlwerk. Den Verbrauch an Feuerfestprodukten zu minimieren, ist nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht von größtem Interesse. Durch eine Verlängerung der Pfannenreise können auch Ressourcen geschont werden. Zustellungsdesigns beruhen momentan oft auf Erfahrungswerten von Ingenieuren und empirischen Regeln, wodurch es zu nicht optimalen Zustellungen kommen kann.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen besseren Überblick über die Einflüsse bestimmter geometrischer Parameter auf das thermomechanische Verhalten einer Stahlpfannenzustellung zu erhalten. Dafür werden im Finite-Elemente-Softwarepaket ABAQUS 2D- und 3D-Simulationen des thermischen und thermomechanischen Verhaltens einer Schlackenzonenzustellung einer sekundärmetallurgischen Stahlpfanne durchgeführt. Die Schlackenzonenzustellung ist dreischichtig aufgebaut und besteht aus Magnesia-Carbon-Steinen als Verschleißfutter, einem monolithischen Dauerfutter und einer Isolierschicht. Die betrachteten geometrischen Faktoren sind eine Variation der Dehnvorgabe des Verschleißfutters im Bereich von 0,2–0,8 mm und die Variation der Stärke der Isolierungsschicht von 0–12 mm. Die Gesamtzustellungsstärke bleibt konstant und wird über das Dauerfutter ausgeglichen. Um den rechnerischen Aufwand zu begrenzen, kommt der Einheitszellenansatz zur Anwendung und das Simulationsmodell wird dabei unter Ausnutzung aller Symmetrien auf ein Viertel der Abmessungen des Verschleißfuttersteines reduziert. Das simulierte Temperaturprogramm ist auf den ersten Pfannenzyklus inklusive vorherigem Aufheizen der Pfanne beschränkt. Um das Materialverhalten abbilden zu können, werden das Drucker-Prager-Kriterium, das Von-Mises-Kriechmodell und eine am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde entwickelte ABAQUS-Subroutine, welche beide Materialmodelle kombiniert, verwendet.

Die Ergebnisse der Dehnvorgabevariation zeigen, dass mit steigender Dehnvorgabe in Umfangsrichtung die maximalen Druckspannungen im Verschleißfutter sowie die maximalen Zugspannungen im Stahlmantel in Umfangsrichtung stark reduziert werden. Der Einfluss auf Spannungen in vertikaler Richtung ist geringer. Die Belastungsreduktion ist auch anhand von geringer werdenden irreversiblen Dehnungen mit steigender Dehnvorgabe abzulesen. Eine zu große Dehnvorgabe verursacht jedoch geöffnete Fugen während der Charge und ist deshalb zu vermeiden.

Anhand der durchgeführten thermischen 2D-Simulationen wurde eine maximale Stärke der Isolierungsschicht von 12 mm für die 3D-Simulationen festgelegt. Eine größere Isolierungsschichtstärke führt zu einem größeren Temperaturunterschied zwischen Heißeite und Stahlmantel. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximalen Verschleißfutterspannungen kaum beeinflusst werden. Die Zugspannungen im Stahlmantel steigen mit zunehmender Isolierung stark an. Die Fugenöffnung während der Standzeit bis zur nächsten Charge kann durch die höheren Temperaturen im Verschleißfutter reduziert werden.

Abstract

The steel ladle is an essential part of steel production as a transport container for liquid steel and for treatment in secondary metallurgy. Furthermore, the steel ladle lining is the largest consumer of refractory products in a steel plant per ton of produced steel. Therefore, minimising refractory consumption is of utmost interest, not only from an economic point of view but extending the ladle lining lifetime can also conserve resources. Currently, lining designs are often based on engineers' experience and empirical rules, which can lead to non-optimal linings.

This work aims to understand better the influences of specific geometrical parameters on the thermomechanical behaviour of a steel ladle lining. For this purpose, 2D and 3D simulations of the thermal and thermomechanical behaviour of a slag zone lining are carried out with the Finite-Element software package ABAQUS. The slag zone lining has a three-layer structure and consists of magnesia carbon bricks as wear lining, a high alumina monolithic permanent lining and an insulating layer. The geometrical factors considered are a variation of the initial expansion allowance of the wear lining in the range of 0.2 - 0.8 mm and the variation of the thickness of the insulation layer, from 0 - 12 mm. However, the total lining thickness remains constant and is compensated by the permanent lining. To limit the computational costs, a unit cell approach is applied, and the simulation model is reduced to a quarter of the dimensions of a wear-lining brick, taking advantage of all symmetries. The simulated temperature programme considers the first ladle cycle, including ladle preheating. The Drucker-Prager criterion, the Von Mises creep model and an ABAQUS subroutine developed at the Chair of Ceramics, which combines both material models, are used to model the material behaviour.

The results of the variation of the expansion allowance show that with increasing expansion allowance in the circumferential direction, the maximum compressive stresses in the wear lining as well as the maximum tensile stresses in the steel shell are strongly reduced in the circumferential direction. The influence on stresses in the vertical direction is less. The stress reduction due to increasing expansion allowance also leads to decreasing irreversible strains. However, a too high expansion allowance causes open joints during the heat and should be avoided.

Based on the 2D thermal simulations performed, a maximum insulation layer thickness of 12 mm was defined for the 3D simulations. A higher insulation layer thickness leads to an increasing temperature difference between the hot side and the steel shell. The 3D simulations show that the insulation layer thickness hardly affects the maximum hot face stresses. The tensile stresses in the steel shell increase significantly with increasing insulation. The joint opening during the idle time until the next heat can be reduced by the higher temperatures in the wear lining.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 PROBLEMSTELLUNG	2
2 STAND DES WISSENS	3
2.1 Stahlpfanne.....	3
2.2 Aufbau von Stahlpfannenzustellungen.....	4
2.3 Finite Elemente Methode zur Simulation von thermo-mechanischen Belastungen in Stahlpfannenzustellungen	5
2.4 Materialmodelle.....	17
2.4.1 Von-Mises-Kriechen [16].....	18
2.4.2 Fließkriterium nach Drucker-Prager [18]	19
2.4.3 Subroutine des Lehrstuhls Gesteinshüttenkunde	20
3 DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN	22
3.1 2D-Einheitszellenmodell	22
3.1.1 Randbedingungen.....	22
3.2 3D- Einheitszellenmodell	22
3.2.1 Randbedingungen.....	23
3.3 Materialparameter.....	25
3.4 Temperaturprogramm	26
3.5 Zeitinkrementation	27
3.6 Aufbau des Simulationsprogrammes	27
3.6.1 Variation der Isolierungsstärke im 2D-Einheitszellenmodell	27
3.6.2 Variation der Dehnvorgabe im 3D-Einheitszellenmodell.....	28
3.6.3 Variation der Isolierungsstärke im 3D-Einheitszellenmodell	29
3.7 Auswertungsschema.....	30
4 ERGEBNISSE, INTERPRETATION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	32
4.1 Thermische Analyse im 2D-Einheitszellenmodell	33
4.2 Einfluss der Variation der Dehnvorgabe	36
4.3 Einfluss der Variation der Isolierungsstärke.....	46
5 RESÜMEE	55
6 REFERENZEN.....	58
ANHANG.....	I

1 Problemstellung

Feuerfeste Zustellungen sind ein wesentlicher Kostenfaktor eines Stahlwerkes. Die Maximierung der Lebensdauer ist aus wirtschaftlicher und umwelttechnischer Sicht notwendig, insbesondere für Aggregate mit hohem Feuerfestverschleiß, wie der Stahlpfanne in der Sekundärmetallurgie. Die Auslegung der meisten Zustellungen beruht momentan auf Erfahrungswerten von Ingenieuren und empirischen Regeln. Das kann zu nicht optimalen Zustellungen führen. Es ist daher erstrebenswert, allgemein gültige Richtlinien als Anhaltspunkte für die Auslegung von feuerfesten Zustellungen zu definieren.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen thermische und thermomechanische Simulationen einer sekundärmetallurgischen Stahlpfannenzustellung mit dem Finite-Elemente-Softwarepaket Abaqus durchgeführt werden, um auftretende Belastungen abschätzen und Einflüsse einzelner Parameter quantifizieren zu können. Ein geeignetes Modell soll auf Basis eines Einheitszellenmodelles erstellt und geometrische Faktoren wie die Stärke der Dehnvorgabe oder Isolierung sollen variiert werden. Die Simulationen sind für die erste Charge inklusive des Pfannenvorheizens unter Verwendung drei unterschiedlicher Materialversagensmodelle durchzuführen.

2 Stand des Wissens

2.1 Stahlpfanne

Die Stahlpfanne (Abbildung 1) ist ein wesentliches Element in der Stahlerzeugung. Dabei dient sie nicht nur als Transportgefäß in der Primärmetallurgie. Durch die steigenden Qualitätsansprüche an Stahl wird sie auch in der Sekundärmetallurgie als Aggregat eingesetzt. Dabei ist sie üblicherweise Temperaturen von bis zu 1680°C ausgesetzt und wird unter anderem durch schnell wechselnde Temperaturen, sogenannte Thermoschocks, beansprucht. Um den thermischen und mechanischen Belastungen standzuhalten, wird die Stahlpfanne mit feuerfesten Produkten ausgemauert. Diese Ausmauerung wird als Zustellung bezeichnet. Da Stahl mit zunehmender Temperatur an Festigkeit verliert, würde dieser ohne den Schutz der Zustellung den Belastungen bei Temperaturen von bis zu 1680°C nicht standhalten können. Eine weitere Aufgabe der Zustellung ist die Minimierung des Wärmeverlustes. Die Auswahl des passenden Feuerfestproduktes ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Die Optimierung der Zustellung bzw. der Designs hat aufgrund der Verlängerung der Zustellungslebensdauer ein nicht zu vernachlässigendes Potenzial [1].

Die Belastungen, die auf eine Stahlpfanne im Einsatz einwirken, lassen sich in drei Kategorien unterteilen: [2]

- Mechanisch, in Form von Erosion
- Chemisch, in Form von Korrosion
- Thermisch

Diese Belastungen treten nicht einzeln, sondern in Kombination auf und wirken sich auf die Eigenschaften der Zustellung in mehreren Aspekten aus. So senkt zum Beispiel eine niedrige thermische Leitfähigkeit den Wärme- und Energieverlust, erhöht jedoch den Temperaturgradienten innerhalb der Zustellung. Ein höherer Temperaturgradient wiederum führt zur Erhöhung der auftretenden Spannungen. Eine Limitierung der einsetzbaren Feuerfestprodukte stellt auch die Basizität der Schlacke dar. Die Basizität beschreibt das Verhältnis zwischen CaO als basische Komponente und SiO₂ als saure Komponente (C/S-Verhältnis). Wird der C/S-Wert der Verschleißfutterzustellung nicht an die Basizität der Schlacke angepasst, führt das zu erhöhter Korrosion durch Lösung des Materials und somit zu einer geringeren Lebensdauer. Das Versagensverhalten und die Gründe dafür wurden in der Vergangenheit bereits gut erforscht und sind weitgehend bekannt. Der Zeitpunkt und das Ausmaß des Versagens hingegen sind aufgrund der großen Anzahl von Einflussfaktoren sehr schwer zu bestimmen. In Abbildung 1 ist eine Stahlpfanne schematisch dargestellt [1–3].

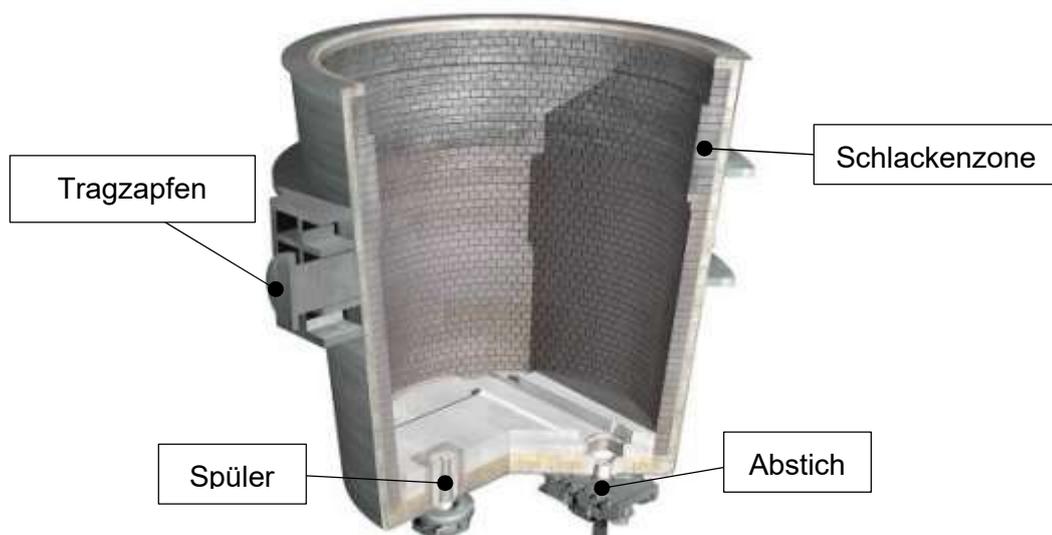


Abbildung 1: Darstellung einer Stahlpfanne [4]

2.2 Aufbau von Stahlpfannenzustellungen

Für die Zustellung von Stahlpfannen eignen sich viele feuerfeste Baustoffe, welche nach mehreren Aspekten kategorisiert werden. Nach chemischer bzw. mineralogischer Zusammensetzung wird zwischen basischen und nichtbasischen Produkten, nach Einbaumethode zwischen geformten und ungeformten Produkten unterschieden. Die Produkte können aber auch anhand des Produktionsverfahrens eingeteilt werden. Die Anforderungen im jeweiligen Bereich der Stahlpfanne sind für die Auswahl der feuerfesten Produkte maßgeblich. In den verschiedenen Zonen werden deshalb Feuerfestprodukte mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt. Je höher der Basizitätsunterschied zwischen Feuerfestprodukt und Schlacke in der Schlackenzone ist, desto höher ist die Korrosion des Feuerfestproduktes in Form von Auflösung in diesem Bereich. Dieses Verschleißverhalten kann minimiert werden, indem die Basizität des Feuerfestproduktes an jene der Schlacke angepasst wird. Die Bewegung des Schmelzbades führt dann in weiterer Folge zu Erosion. In der Stahlbadzone steht die Minimierung des Wärmeverlustes und die Stahlqualität im Vordergrund. Die Aufprallzone hingegen verlangt einen erhöhten Widerstand gegen mechanischen Verschleiß [2, 5].

In Abbildung 2 ist ein beispielhafter Aufbau einer feuerfesten Zustellung dargestellt. Die verschiedenen Zustellungsbereiche sind farblich hervorgehoben.

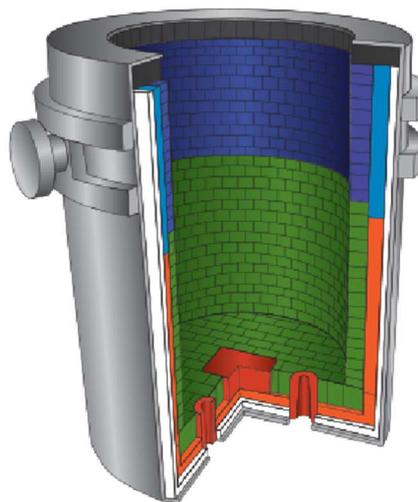


Abbildung 2: Zustellung einer Stahlpfanne: Schlackenzone (blau), Stahlbadzone (grün), Boden (grün); Aufprallzone ist in diesem Fall nicht extra ausgewiesen [6].

Die einzelnen Bereiche der Stahlpfannenzustellung können aus mehreren Schichten aufgebaut sein. Ein möglicher schichtweiser Aufbau wird im Folgenden kurz erläutert.

Das **Verschleißfutter** (grün bzw. dunkelblau) bildet die sogenannte Heißeite und ist in direktem Kontakt mit der Schmelze bzw. der Schlacke. Sie muss den größten Einwirkungen standhalten. Neben der im vorherigen Absatz beschriebenen Korrosion und Erosion erfährt diese Schicht auch die höchsten Temperaturen. Die dadurch verursachte thermische Dehnung führt zu Spannungen im Feuerfestmaterial. Übersteigen diese Spannungen die Materialfestigkeit und/oder treten zyklisch auf, kann das Materialversagen verursachen [2].

Das **Dauerfutter** (hellblau bzw. orange) dient in erster Linie als Schutzschicht im Falle des Versagens des Verschleißfutters. Sie muss geringeren Belastungen standhalten als das Verschleißfutter. Die Temperatureinwirkung und die damit verbundene thermische Dehnung ist allerdings immer noch erheblich und ist vor allem abhängig vom Temperaturgradienten. Ein weiterer Zweck dieser Schicht ist die Reduzierung des Wärmeverlustes [2].

Die **Isolierung** (weiß) senkt die Temperatur des Stahlmantels (Schicht 4, grau) und dient der weiteren Reduzierung des Wärmeverlustes. Während die Temperatur des Verschleiß- und Dauerfutters erhöht wird, sinkt jene des Stahlmantels. Dadurch erhält man einen größeren Temperaturgradienten und damit auch höhere Spannungen im Verschleißfutter. Die erhöhten Spannungen können jedoch durch die Flexibilität und Nachgiebigkeit der Isolierung zu einem gewissen Grad wieder abgebaut werden [7].

Der **Stahlmantel** (grau) bildet die Grundform der Stahlpfanne. Er muss den Zugspannungen standhalten, welche durch die Zustellung aufgebracht werden. Da die Festigkeit von Stahl mit steigender Temperatur sinkt, ist eine möglichst geringe Oberflächentemperatur des Stahlmantels erstrebenswert.

2.3 Finite Elemente Methode zur Simulation von thermo-mechanischen Belastungen in Stahlpfannenzustellungen

Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung der feuerfesten Zustellung und des Stahlmantels wird die Stahlpfanne im Betrieb erheblichen thermomechanischen Belastungen ausgesetzt. Diese werden sowohl von den Prozessparametern, dem Zustellungsdesign als auch von den jeweiligen Materialeigenschaften beeinflusst. Für die Simulation und Berechnung der Spannungen und der Verformungen hat sich die Finite Elemente Methode (FEM) als nützliches Werkzeug erwiesen [7].

Die Finite Elemente Methode wird verwendet, um den zeitlichen Verlauf der Spannungen und Dehnungen in der Zustellung zu simulieren. Mit Hilfe der Ergebnisse wird versucht, das Zustellungsdesign zu optimieren und somit die Lebensdauer zu erhöhen. Die Stahlpfanne ist der größte Verbraucher an Feuerfestprodukten in einem Stahlwerk. Durch die Lebensdauermaximierung mit Hilfe der FEM-Analysen kann dieser Verbrauch deutlich reduziert und Kosten eingespart werden. Auch spielt der Energieverlust durch Wärmeabgabe eine wesentliche Rolle, welcher ebenfalls simuliert werden kann. Eine FEM-Analyse der Stahlpfannenkonstruktion ist daher unerlässlich [6].

Im Folgenden werden ausgewählte Arbeiten zum Thema thermomechanische Finite Elemente Simulationen von Stahlpfannen zusammengefasst. Damit soll verdeutlicht werden, wie umfangreich und vielseitig dieser Bereich ist und welche Möglichkeiten FEM-Simulationen in diesem Zusammenhang bieten.

Andreev et al. [8] haben in einer Fallstudie das thermomechanische Verhalten und Versagen von Feuerfestprodukten mittels FEM-Simulation untersucht. Dazu wird das Einwirken von zwei thermomechanischen Belastungen auf eine Stahlpfanne untersucht: zum einen das erste Vorheizen der kalten Pfanne und zum anderen der Temperaturschock, den eine Pfanne erfährt, wenn sie mit Flüssigstahl befüllt wird.

Aufgrund der charakteristischen Struktur (Abbildung 3) weisen feuerfeste Produkte ein Bruchverhalten auf, welches von rein elastischem Versagen abweicht. Druck verursacht die Bildung von Mikrorissen im Material und durch Zugkräfte kommt es zu „strain softening“. Dies ist die Fähigkeit des Materials, selbst nach Rissbildung noch Belastungen aufzunehmen. Druckversagen oder Scherversagen verursacht Verformungen, welche durch eine Volumensänderung gekennzeichnet sind. Feuerfeste Werkstoffe neigen außerdem dazu, sich bei steigendem, hydrostatischem Druck zu verfestigen. Des Weiteren beeinflussen bereits gebildete Mikrorisse das Materialverhalten stark. Eine Beschreibung dieses sehr komplexen Bruch- und Versagensverhaltens kann in [8] gefunden werden.

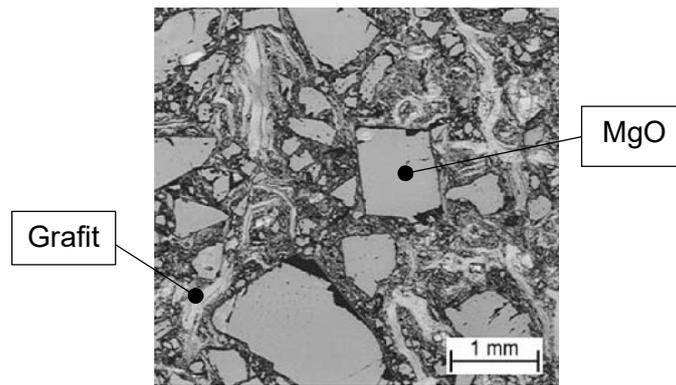


Abbildung 3: Mikrostruktur eines Magnesia-Carbon-Steines [8]

Da für Zug- und Druckbelastungen unterschiedliche Materialfestigkeiten gelten, wird ein kombiniertes Versagenskriterium angewandt. Die maximalen Zug-Hauptspannungen werden nach dem Kriterium von Rankine, reine Druckspannungen nach dem Verformungskriterium nach Drucker-Prager berechnet. Das Materialversagen im Zugbereich wird durch das sogenannte „smeared crack model“ beschrieben, also einem Modell der „verschmierten Risse“. Dabei wird die Rissposition nicht exakt bestimmt, sondern eine Gesamtverformung eines Elements bestehend aus Rissdehnung und elastischer Dehnung angenommen. Die benötigten Materialparameter für die Simulation werden experimentell ermittelt. Der Großteil der Simulationen wird mit dem FEM-Programm DIANA durchgeführt, da es für die hier angewandten Modelle das am besten geeignete ist. Die Programme ABAQUS und SBETA werden ebenfalls verwendet [8].

Die Zustellung der untersuchten Stahlpfanne ist aus Verschleißfutter (MgO-C-Steine), Dauerfutter (Feuerfestmasse) und Stahlmantel aufgebaut. Unter Anwendung entsprechender mechanischer und thermischer Randbedingungen kann das 3D-FEM-Modell auf $\frac{1}{4}$ der Steingeometrie reduziert und damit der Simulationsaufwand minimiert werden. In der Simulation wird sowohl der Aufheizprozess der kalten Pfanne als auch der Thermoschock beim Befüllen der aufgeheizten Pfanne mit Flüssigstahl simuliert. Zu Beginn des Aufheizprozesses treten kaum Spannungen auf, da sich der Stein bis zum Schließen der Fugen uneingeschränkt ausdehnen kann. Eine weitere Temperaturerhöhung nach Schließen der Fugen führt zu Spannungen im Stein in Vertikal- und Umfangsrichtung, wobei es zur Rissbildung parallel zur Heißeite kommt. In weiterer Folge treten Abplatzungen an der Heißeite des Verschleißfutters auf. Zyklische Thermoschocks werden am 2D-Modell untersucht. Diese Betrachtung zeigt, dass die reine Wiederholung des unveränderten Thermoschocks zu einem stetigen Fortschreiten der Risse führt. Dieser Effekt wird durch die irreversible Verschiebung der Rissflächen zueinander hervorgerufen, welche nach der Entlastung zurückbleibt. Dieser irreversible Teil ist ein wesentlicher Verschleißfaktor bei Feuerfestmaterialien, die durch zyklische Belastungen beansprucht werden [8].

Eine thermomechanische Berechnung von Industrieaggregaten ist äußerst kompliziert. Durch das Modellieren sogenannter Einheitszellen, welche symmetrische Ausschnitte darstellen, die repräsentativ für das Gesamtaggregat sind, wird eine Finite Elemente Simulation möglich. Dadurch können nicht nur mögliche Versagensursachen und -stellen untersucht und ausfindig gemacht werden, sondern auch eruiert werden, welchen Einfluss Materialparameter, Zustellungsdesign und Prozessparameter darauf haben [8].

Damhof et al. [9] untersuchen mit einer FEM-Simulation die Schäden an der feuerfesten Ausmauerung von Aggregaten der Stahlproduktion aufgrund eines Temperaturschocks. Das Programm ANSYS wird verwendet, um ein experimentell validiertes Schadensmodell mit einem thermoelastischen Finite Elemente Paket zu koppeln. Um die

Anwendbarkeit dieser computergestützten Berechnung zu verdeutlichen, wird der Schaden durch Thermoschockbelastung an einem RH-Rüssel und an der feuerfesten Zustellung einer Stahlpfanne modelliert. Der Gesamtschaden setzt sich dabei aus zwei Teilen zusammen: zum einen wird ein Teil des Schadens durch die durch Temperaturgradienten hervorgerufenen Dehnungen verursacht und zum anderen entsteht ein thermischer Schaden, der nur abhängig von der erreichten Temperatur ist.

Die RH-Anlage ist ein Aggregat der Sekundärmetallurgie zur Entgasung des Stahls. Die thermomechanische Untersuchung des Rüssels beschäftigt sich mit dem Versagen des Feuerbetons, welcher die Stahlkonstruktion vor hohen Temperaturen schützt. Kühlkanäle sorgen für eine weitere Absenkung der Stahltemperatur, bringen dadurch aber auch einen gewissen Wärme- und somit Energieverlust mit sich. Ein Arbeitszyklus des RH-Rüssels umfasst mehrere Schritte: Vorheizen, Eintauchen in die mit Flüssigstahl gefüllte Stahlpfanne, den Prozess des Entgasens durch Anlegen eines technischen Vakuums und der Spülung sowie das Auftauchen und die Stehzeit des Rüssels vor dem nächsten Arbeitszyklus. Es wird sowohl Wärmestrahlung als auch Wärmekonvektion berücksichtigt [9].

In der Stahlpfanne wird das Verhalten des Verschleißfutters im Bereich der Schlackenzone simuliert. Dazu wird ein Einheitszellenmodell bestehend aus einem $\frac{1}{4}$ -Stein des Verschleißfutters, Dauerfutter, Isolierung, mikroporöser Schicht und dem Stahlmantel modelliert. Eine vorgegebene Fugenstärke zum benachbarten Stein (Dehnvorgabe) ist in diesem Modell nicht ersichtlich. Die thermischen Randbedingungen unterscheiden sich von jenen des Rüssels. Zunächst wird die Stahlpfanne vorgeheizt und im Anschluss mit Flüssigstahl befüllt. Danach folgen der Entgasungsprozess und das Entleeren der Stahlpfanne. Das Vorheizen findet allerdings nicht zyklisch, sondern einmalig statt [9].

Das Materialverhalten wurde von Damhof et al. [10] bereits näher beschrieben. Die benötigten Materialparameter werden durch in der Industrie übliche Materialtests ermittelt. Das Materialmodell und das Versagensverhalten werden experimentell validiert.

Die Schäden durch den Thermoschock am Rüssel werden für verschiedene Prozessbedingungen simuliert und nach jeweils vier Arbeitszyklen betrachtet. Die größten Schäden treten dabei am Feuerbeton an der Außenseite des Rüssels auf, hervorgerufen durch den Kontakt mit Flüssigstahl beim Eintauchen. Eine Reduktion dieser Schäden kann durch eine Reduktion der Stehzeit zwischen zwei Arbeitszyklen erfolgen. Dadurch ist die Temperatur des Feuerfestmaterials vor dem nächsten Eintauchen höher und der Temperaturunterschied zum Flüssigstahl geringer. Der Thermoschock fällt somit weniger gravierend aus und die Lebensdauer des Rüssels wird erhöht [9].

In der Schlackenzone der Stahlpfanne beträgt die Temperatur des Verschleißfutters nach dem Vorheizen bereits 850°C. Dadurch entsteht sowohl ein Temperaturgradient in der Zustellung als auch eine bereits erhebliche thermische Ausdehnung und erste Schäden werden verursacht. Der Kontakt mit Flüssigstahl (*Hot Shock*) im nächsten Schritt führt zu weiterer Ausdehnung an der Heißeite, welche allerdings durch benachbarte Steine unterdrückt wird. Daraus resultiert ein Druckspannungszustand, welcher in einem gewissen Abstand zur Heißeite in einen Zugspannungszustand übergeht. Beim Entleeren der Pfanne wird das heiße Feuerfestmaterial der Umgebungsluft ausgesetzt (*Cold Shock*). Die thermisch ausgedehnten Steine kontrahieren sich wieder. Dies führt zu Zugspannungen und horizontalen Rissen in vertikaler Steinmitte. Diese Ergebnisse decken sich mit den in der Praxis beobachteten Schadensbildern wie sie in Abbildung 4 zu sehen sind [9].



Abbildung 4: Durch Druckspannungen verursachtes Abplatzen an der Heißseite des Verschleißfutters führt zu ebenen Bruchflächen, die in weiterer Folge durch Erosion abgerundet werden und den sichtbaren Vorverschleiß in den Fugen hervorrufen können [9].

Die höchste Temperatur und auch Belastung erfährt in der Stahlpfanne das Verschleißfutter an der Heißseite. Hohe Druckspannungen in Umfangsrichtung führen dort zu irreversiblen Verformungen. Diese Verformungen können im weiteren Verlauf zu einer Öffnung der Fugen zwischen den Steinen führen. Die sogenannte kontrollierte Expansion soll dabei helfen, diesen irreversiblen Verformungen und damit der Fugenöffnung entgegenzuwirken. Das Potential der kontrollierten Expansion ist dabei abhängig von irreversiblen Verformungen durch Phasentransformationen, welche durch Langzeit-Hochtemperatur-Dilatometer-Messungen bestimmt werden. Mithilfe der Finite Elemente Methode wird der Einfluss von Materialparametern, Zustellungsdesign und Prozessparametern, insbesondere im Vorheizprozess, untersucht. Auch der Einfluss einer Isolierung im Zustellaufbau einer Stahlpfanne auf das thermomechanische Verhalten wird von Gruber et al. [7] untersucht.

Die thermomechanischen Belastungen können je nach Prozess und Anwendungsgebiet entweder durch einen „Hot Shock“ oder durch einen „Cold Shock“ verursacht werden. Beim Hot Shock treten an der Heißseite Druckspannungen auf, welche in einem gewissen Abstand dazu in Zugspannungen übergehen. Bei weiterem Wärmefluss verschiebt sich dieser Übergang immer weiter in Richtung Kaltseite. Beim Cold Shock ist das Spannungsbild umgekehrt zum Hot Shock und die Heißseite steht unter Zug. Diese Spannungen sind das Resultat der unterschiedlichen thermischen Dehnungen im Material. Die Höhe dieser Spannungen und das Ausmaß der thermischen Dehnungen hängen von vielen Faktoren ab, weshalb ein hoher Detaillierungsgrad des Finite-Elemente-Modells notwendig ist. Das hier verwendete 3D-Modell besteht aus Verschleißfutter, Dauerfutter, Isolierung sowie Stahlmantel und das Verhalten unter drei verschiedenen Temperaturprogrammen wird untersucht. Für ein mehrachsiges Belastungsmodell wird das in ABAQUS bereits integrierte Materialmodell nach Mohr-Coulomb [11] gewählt, Druckspannungen werden auf die doppelte Kohäsion begrenzt. Der Elastizitätsmodul wird als temperaturabhängig angenommen und für den gesamten angewandten Temperaturbereich experimentell ermittelt [7].

Die Ursache für die Schäden an den Feuerfestprodukten ist die eingeschränkte thermische Ausdehnung. In dieser Arbeit wird in zwei Ursachen für diese Einschränkung unterteilt. Einerseits kann sich das Feuerfestprodukt selbst behindern, andererseits kann auch eine externe Einschränkung – wie etwa der äußere Stahlmantel einer Stahlpfanne – der Grund dafür sein. Letztere ist verantwortlich für Druckspannungszonen in großen Teilen der Zustellung. Diese Druckspannungen können das Kriechen des Materials begünstigen und dadurch zu irreversiblen Verformungen führen. Bei hohen Druckspannungen kann

Druckversagen ebenfalls für plastische Verformungen verantwortlich sein. Das Abkühlen des Materials durch einen Cold Shock kann dann wiederum eine Öffnung der Fugen zwischen den Steinen verursachen. Treten dann bei einem Hot Shock Zugspannungen in einem gewissen Abstand zur Heißseite auf, sind diese durch die offenen Fugen nicht mehr eingeschränkt und es kommt zum Materialversagen. Solange die Feuerfestmaterialien linear-elastisches Verhalten zeigen, kommt es zu keiner Fugenöffnung. Im Verschleißfutter treten Druck- und im Stahlmantel Zugspannungen auf [7].

Der Einsatz einer Isolierung im Zustellungsdesign verändert die Temperaturverteilung im gesamten Querschnitt maßgeblich. Der Wärmefluss von der Heiß- zur Kaltseite wird reduziert und damit auch die Temperatur des Stahlmantels, während die Temperatur der Feuerfestprodukte steigt. Dadurch steigt auch die irreversible Verformung, da die unterschiedliche thermische Dehnung nur zu einem Teil von der Verformbarkeit der Isolierung ausgeglichen werden kann. Überraschenderweise wird die benötigte kontrollierte Expansion beim Einsatz einer Isolierung reduziert, da die Stahlmanteltemperatur konstanter ist, wenn an der Heißseite Maximalspannungen auftreten. Außerdem ist sie stark abhängig von der Temperaturverteilung im Querschnitt, wohingegen Materialparameter wie E-Modul und Druckfestigkeit nur einen geringen Einfluss haben. Eine Erhöhung der Vorheiztemperatur führt zu einer größeren radialen Ausdehnung des Stahlmantels und damit zu einer Reduktion der irreversiblen Verformungen [7].

Bisher wurden hier nur Stahlpfannen mit einem Verschleißfutter aus geformten Feuerfestprodukten, also Steinen, und dahinter liegendem monolithischen Dauerfutter betrachtet. Bareiro et al. [3] betrachten nun das thermomechanische Verhalten einer Stahlpfannenzustellung, bei der bereits das Verschleißfutter monolithisch ausgeführt wird. Die untersuchte Zustellung ist aus drei Schichten Feuerbeton aufgebaut. Mit Hilfe einer Finite Elemente Untersuchung im Softwarepaket ABAQUS werden vier Zustellungsvarianten thermomechanisch analysiert. In den drei Schichten dieser Varianten werden Feuerbetone mit unterschiedlichen Aluminagehalten (51m%, 71m%, 90m% Alumina) kombiniert. Man spricht dabei von funktional abgestuften Materialien, die dazu dienen, die Spannungsverteilung in der Zustellung aufgrund thermischer und mechanischer Belastung besser steuern zu können. Die Stahlpfanne hat dabei einen Innendurchmesser von 3,5 Metern und die Dicke jeder der drei Schichten Feuerbeton beträgt 0,10 Meter. Die thermomechanische Analyse besteht aus zwei Simulationsschritten: dem Aufheizprozess bis 1200°C und der anschließenden mechanischen und thermischen Belastung durch den Flüssigstahl. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Die einzelnen Schichten sind homogen, isotrop und perfekt mit den jeweils benachbarten Schichten verbunden
- Verformungen nach dem Hook'schen Gesetz und der Theorie der kleinen Dehnungen
- Alle physischen Randbedingungen sind die eines axisymmetrischen Systems
- Annahme einer stationären Wärmeleitung für das thermoelastische Problem
- Die axiale Dehnung innerhalb jeder Schicht ist gleichmäßig

Die vier untersuchten Zustellungsvarianten sind folgende Kombinationen (die erstgenannte Schicht ist im Kontakt mit Flüssigstahl) [3]:

- A51 – A71 – A90
- A90 – A71 – A51
- A51 – A51 – A51
- A90 – A90 – A90

Zur Auswertung des Einflusses der verschiedenen Kombinationen auf die thermischen Spannungen werden die Temperaturgradienten (TG) im Zustellungsquerschnitt am Ende des Aufheizprozesses, also bei einer Temperatur von 1200°C, ausgewertet. Die unterschiedlichen

Materialparameter – vor allem Unterschiede der thermischen Leitfähigkeit – liefern unterschiedliche TG im Querschnitt und damit unterschiedliche Spannungsverteilungen. Den geringsten TG, also die geringste Steigung der Temperaturkurve, und damit die geringste Beanspruchung erfährt das Verschleißfutter in der Kombination A90-A71-A51. Mit der Kombination in umgekehrter Reihenfolge A51-A71-A90 wird der höchste TG im Verschleißfutter erreicht. Dieser TG zeigt auch die größten Veränderungen zwischen den einzelnen Schichten und ist damit der ungleichmäßigste. Die TG der Varianten A51-A51-A51 und A90-A90-A90 liegen zwischen den zuvor genannten. In Abbildung 5 sind die TG der einzelnen Kombinationen zum besseren Verständnis dargestellt.

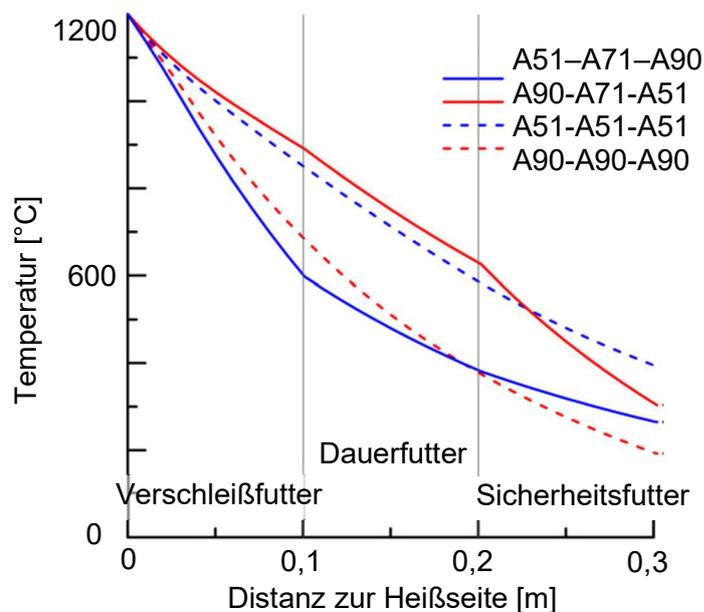


Abbildung 5: Temperaturgradienten der vier untersuchten Kombinationen am Ende des Aufheizens bei 1200°C

Geringe TG verursachen geringere thermische Spannungen und Verformungen und dadurch wiederum geringere Schäden als sehr ungleichmäßige, steile TG. Materialien und Materialkombinationen mit konstantem Temperaturgefälle zeigen daher grundsätzlich eine bessere Performance in Hinsicht des thermomechanischen Verhaltens und der Lebensdauer. Die Aufheizraten und damit die Dauer des Aufheizprozesses hängt ebenfalls zu einem gewissen Maß von dieser Materialeigenschaft ab. Die geringsten Schäden an der Zustellung treten bei den Kombinationen mit den konstantesten Temperaturgradienten auf. Die Kombination A90 – A71 – A51 zeigt in dieser Hinsicht den besten TG der vier untersuchten Kombinationen. In allen vier Fällen ist die äußerste Schicht, also jene Schicht in Kontakt mit dem Stahlmantel, Zugspannungen ausgesetzt und die maximalen Druckspannungen im Verschleißfutter treten am Ende des Aufheizprozesses auf [3].

Die Zugabe von Magnesia-Alumina-Spinell in Alumina-Feuerfestprodukte brachte zwei Verbesserungen mit sich. So konnten nicht nur die thermomechanischen Eigenschaften verbessert werden, auch die Resistenz gegen Schlackenangriff wurde erhöht. Das thermomechanische sowie das irreversible Verhalten eines Alumina-Spinell-Produktes in der Schmelzbadzone einer Stahlpfanne wird von Samadi et al. [12] untersucht. Dazu wird ein keilförmiges 3D-Einheitszellenmodell des gesamten Querschnittes der Stahlpfanne verwendet (Abbildung 6).

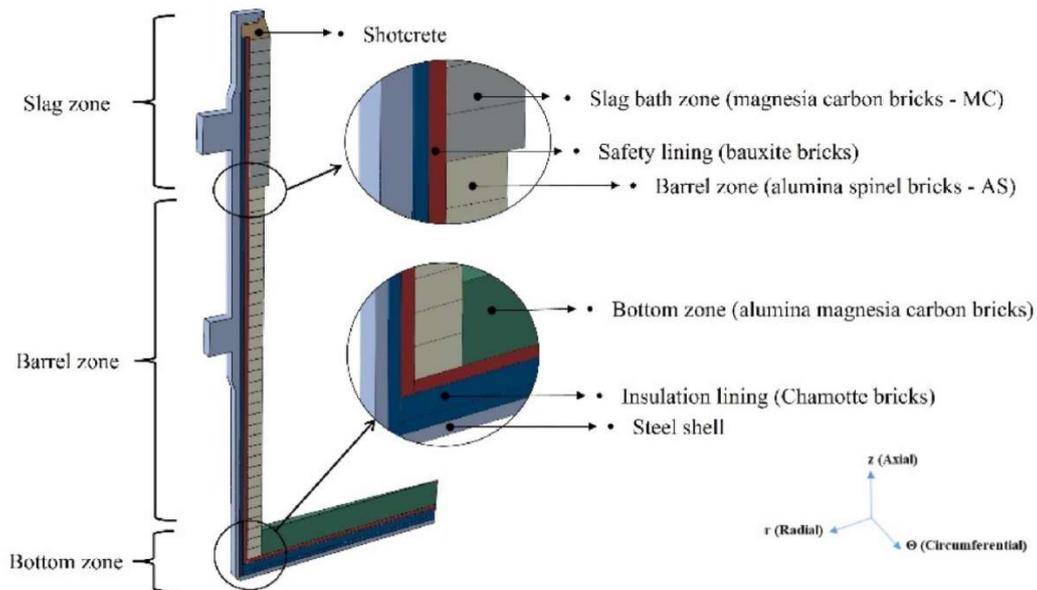


Abbildung 6: 3D-Einheitszellenmodell über die gesamte Höhe der Stahlpfanne [12]

Neben Zugversagen wird auch Scherversagen und Kriechen untersucht. Das Scherversagen wird dabei durch das Drucker-Prager-Modell modelliert. Dem Kriechen liegen das Norton-Bailey-Kriechmodell und die von-Mises-Spannungen zu Grunde. Zugversagen wird durch das „*Damaged concrete plasticity model*“ berücksichtigt. Um den Simulationsaufwand gering zu halten, wird die Isolierung aufgrund des geringen E-Moduls und der geringen Stärke (5 mm) nicht modelliert. Da die Isolierung sich aber wesentlich auf die Temperaturverteilung auswirkt, wird stattdessen deren thermische Leitfähigkeit auf einen 5 mm großen Spalt zwischen Dauerfutter und Stahlmantel angewandt. Vertikale Fugen werden durch eine unendlich steife Platte in der Fugenmitte zwischen zwei Steinen modelliert. In horizontaler bzw. radialer Richtung sind die Feuerfestmaterialien hingegen im direkten Kontakt. Die einwirkende thermomechanische Belastung ist ein Arbeitszyklus der Pfanne, welcher drei Schritte umfasst: das Aufheizen der kalten Pfanne, das Befüllen und anschließende Wiederausgießen der Pfanne sowie eine Stehzeit, in der eine Inspektion und gegebenenfalls kleine Reparaturen stattfinden können, bevor der nächste Arbeitszyklus beginnt. Die Temperatur des Flüssigstahls wird mit 1650°C angenommen und die Umgebungstemperatur mit 25°C [12].

Zunächst wird eine Versuchsreihe zur Untersuchung des Einflusses der vertikalen Fugenstärke, sowie eine Reihe mit unterschiedlichen Reibungsbeiwerten zwischen den Steinen durchgeführt. In beiden Reihen wird ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen. Als weiteren Schritt haben Samadi et al. [12] die Simulationen über fünf Chargen für verschiedene Materialmodelle des Verschleißfutters durchgeführt. Dabei werden die vier Phänomene Elastizität, Kriechen, Zugversagen und Scherversagen in Kombination mit jeweils plastischem und elastischem Stahlmantel untersucht.

Die Fugenöffnung wird sowohl am Ende der Verweilzeit nach dem Prozessschritt als auch am Ende des Vorheizens betrachtet. Die vertikalen und die horizontalen Fugen sind für alle Kombinationen aus Dehnvorgaben und Reibungskoeffizienten am Ende der Verweilzeit geschlossen. Nach dem Vorheizen ist das an der Heißeite ebenfalls der Fall. An der Kaltseite hingegen schließen sich die vertikalen Fugen nicht mehr vollständig und die Fugenöffnung nimmt mit steigender Dehnvorgabe zu [12].

Die Auswertung des irreversiblen Verhaltens liefert Erkenntnisse für das Scher- und Kriechverhalten im Verschleißfutter. Aus dem zeitlichen Spannungsverlauf an der Heißeite kann man schließen, dass das Scherversagen bereits beim Vorheizen auftritt. Kriechen tritt an der Heißeite in der ersten Charge auf. In der Mitte des Steines hingegen ist die

Materialtemperatur erst in der zweiten Charge hoch genug für das Auftreten von Kriechen. Am Ende der fünften Charge zeigt Scherversagen einen wesentlichen Einfluss auf die Vertikalspannungen und reduziert diese an der Heißseite um mehr als die Hälfte. In der Mitte des Steines verursacht Zugversagen zum gleichen Zeitpunkt eine Reduktion der Vertikal- und Umfangsspannungen um knapp ein Drittel. Die Berücksichtigung der Plastizität im Stahlmantel ist entscheidend für die Spannungsverteilung und reduziert die Spannungen in der Zustellung in alle Richtungen. Auch die Verformungen im Verschleißfutter, welche durch Kriechen, Scher- und Zugversagen verursacht werden, reduzieren sich dadurch. Bei einer Nicht-Berücksichtigung hingegen, übersteigen die Zugspannungen die Festigkeit des Stahls signifikant und es kommt zum Versagen. Kriechverformungen im Verschleißfutter sind an der Heißseite am höchsten und nehmen mit zunehmender Entfernung davon ab. Grund dafür ist die abnehmende Temperatur. An der Kaltseite des Verschleißfutters tritt nahezu keine Verformung durch Kriechen auf. Zugversagen hingegen nimmt mit zunehmender Entfernung zur Heißseite zu, ebenso wie die Zugspannungen im Falle des Hot Shocks. Wird im Stahlmantel Plastizität berücksichtigt, steigen durch die abnehmenden Druckspannungen auch die Verformungen durch Zugversagen im Verschleißfutter. Die Ergebnisse zeigen auch, dass es während des Vorheizens bereits zu Scher- und Zugversagen kommt. Kriechen hingegen erfordert höhere Temperaturen und tritt daher erst später auf [12].

Eine Reduktion der vertikalen Fugenbreite führt zur Erhöhung der Von-Mises-Spannungen sowohl im Verschleißfutter als auch im Stahlmantel. Berücksichtigt man die Reibung zwischen den Steinen, werden diese Maximalspannungen im Stahlmantel reduziert und steigen im Verschleißfutter. Die Simulation zeigt auch, dass der Beitrag des Scher- und Zugversagens zur Fugenöffnung und Spannungsreduktion im Verschleißfutter geringer ist als jener des Kriech-Phänomens. Außerdem sind Radialspannungen klein und vernachlässigbar im Vergleich zu Vertikal- und Umfangsspannungen [12].

Die Lebensdauer einer Stahlpfannenzustellung hängt von vielen Konstruktionsfaktoren (Schichtdicke, Fugenbreite, ...) und Prozess- und Materialparametern ab. Das Finden der für die jeweilige Anwendung optimalen Zustellung stellt sich daher als äußerst schwieriges Unterfangen dar. Mithilfe der Taguchi-Methode und einer Finiten Elemente Simulation versuchen Hou et al. [13] den Einfluss der einzelnen Parameter und Faktoren auf das thermomechanische Verhalten zu quantifizieren. Um die minimale Anzahl an Simulationen zu ermitteln, wird eine Simulationsplanung anhand eines *orthogonalen Arrays* durchgeführt. *Analysis of variance* (=ANOVA) und *signal-to-noise-ratio* (=S/N-Verhältnis) sind weitere Werkzeuge der Taguchi-Methode. ANOVA ist eine statistische Methode zur quantitativen Bewertung des Einflusses der einzelnen Faktoren auf die Ergebnisse und deren Zuverlässigkeit, das S/N-Verhältnis dient als Qualitätsindex.

Der hier untersuchte Bereich ist die Schlackenzone einer Stahlpfanne. Dazu wird ein 2D-Einheitszellenmodell erstellt. Dieses besteht aus zwei Hälften eines Feuerfeststeins (Verschleißfutter) inklusive dazwischenliegender Fuge, Dauerfutter (monolithisch), Faserplatte und Stahlmantel (Abbildung 7a). Der Effekt einer Isolierung und eines Dauerfutters in Form von Steinen anstatt eines monolithischen Dauerfutters wird in einer weiteren Untersuchung betrachtet (Abbildung 7b). Die FE-Simulation erfolgt mit dem Programm ABAQUS, wobei elastisches Materialverhalten angenommen wird. Die Simulationsergebnisse werden in Hinblick auf den Einfluss der folgenden zehn Faktoren (A–J) ausgewertet [13]:

- Schichtdicke
 - A - Verschleißfutter (*Working lining*)
 - B - Dauerfutter (*permanent lining*)
 - C - Isolierung (*insulation lining*)
 - D - Stahlmantel (*steel shell*)
- Thermische Leitfähigkeit (konstant, temperaturunabhängig)
 - E - Verschleißfutter
 - F - Dauerfutter

- G - Isolierung
- Elastizitätsmodul (konstant, temperaturunabhängig)
 - H - Verschleißfutter
 - I - Dauerfutter
 - J - Stahlmantel

Von Interesse ist dabei die Außentemperatur des Stahlmantels und die maximale Zugspannung in diesem sowie die maximale Druckspannung im Verschleißfutter. Ein simulierter Arbeitszyklus umfasst das Aufheizen auf 1100°C über 20 Stunden, einen Thermoschock durch Befüllen mit Flüssigstahl (1600°C), einen sekundärmetallurgischen Prozessschritt und eine Verweilzeit (50 min) nach dem Entleeren der Pfanne. Verschiebungen in radialer Richtung sind nicht unterdrückt, in Umfangsrichtung wird die Bewegung unterbunden. Der Wärmefluss von der Heiß- zur Kaltseite des gesamten Modelles wird berücksichtigt [13].

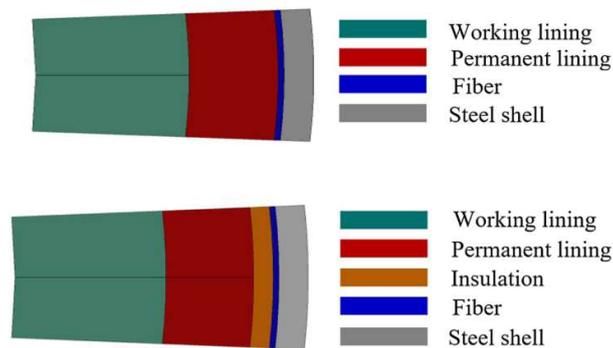


Abbildung 7: Aufbau des 2D-Modelles a) ohne Isolierung mit monolithischem Dauerfutter und b) mit Isolierung und Dauerfutter aus geformten Produkten [13]

Die Ergebnisse in dieser Arbeit sollen als Hilfsmittel für das Design des optimalen Zustellungskonzeptes dienen. Die Ergebnisse sind im Folgenden qualitativ zusammengefasst [13].

Den größten Einfluss auf die Außentemperatur des Stahlmantels haben (in dieser Reihenfolge) die Schichtdicke des Verschleißfutters, die thermische Leitfähigkeit sowie die Schichtdicke der Isolierung und die thermische Leitfähigkeit des Verschleißfutters. Die maximale Zugspannung im Stahlmantel zeigt die größte Abhängigkeit von der thermischen Leitfähigkeit der Isolierung, gefolgt vom E-Modul des Verschleißfutters, der Dicke des Stahlmantels und der thermischen Leitfähigkeit des Verschleißfutters. Auf die maximale Druckspannung im Verschleißfutter hat dessen E-Modul den größten Einfluss, wobei mit steigendem E-Modul auch die Spannungen steigen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 nochmals grafisch dargestellt [13].

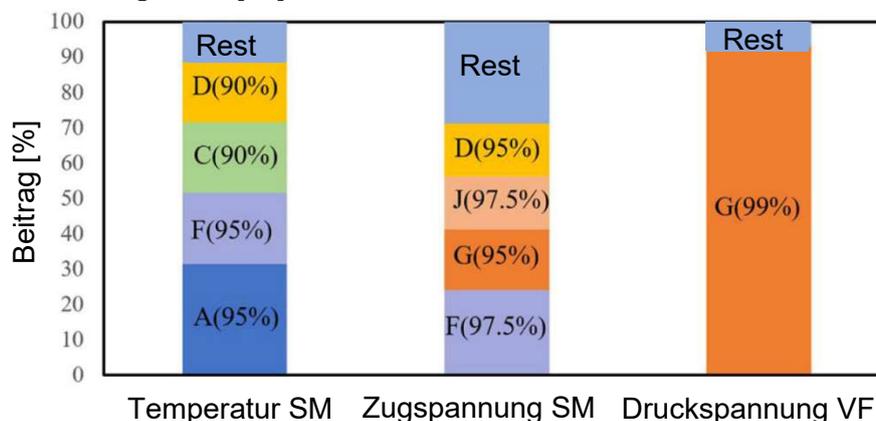


Abbildung 8: Beiträge und Konfidenzniveaus der jeweiligen Faktoren zu den betrachteten thermomechanischen Größen (SM = Stahlmantel, VF = Verschleißfutter) [13]

Die Optimierungsstudie mit dem Ziel einer optimalen Zustellung unter dem Einsatz einer Isolierung kommt zu dem Ergebnis, dass das Verschleißfutter in Hinsicht auf die betrachteten thermomechanischen Größen eine möglichst hohe thermische Leitfähigkeit und einen möglichst geringen E-Modul aufweisen sollte [13].

Gruber et al. [14] betrachten die Dauerhaftigkeit einer mit Steinen zugestellten Stahlpfanne anhand von mechanischen Gesichtspunkten. Die Untersuchungen in diesem Paper zeigen die Zusammenhänge zwischen irreversiblen Druckdehnungen an der Heißseite, Fugenöffnung zwischen den Steinen und der Stabilität der Zustellung. Die Möglichkeiten einer Dehnvorgabe, um den irreversiblen Verformungen entgegenzuwirken, werden ebenso untersucht.

Zustellungen von Stahlpfannen mit MgO-C-Steinen im Bereich der Schlackenzone versagen oftmals bereits nach wenigen Chargen. Risse bilden sich in radialer Richtung und breiten sich vertikal aus. Um die Ursachen für dieses Verhalten besser zu verstehen und mögliche Gegenmaßnahmen zu finden, werden thermomechanische Finite Elemente Simulationen durchgeführt. Das Ziel von Gruber et al. [14] in dieser Arbeit ist die Berechnung der notwendigen Dehnvorgabe, um geschlossene Fugen an der Heißseite während des Einsatzes zu gewährleisten. Dazu wird ein Modell bestehend aus Verschleißfutter (zwei Halbsteine), Dauerfutter, Isolierung und Stahlmantel erstellt (Abbildung 9). Vor Rissbildung im Material wird linear-elastisches Materialverhalten angenommen. Das Druckversagen wird durch ein plastisches Fließkriterium berücksichtigt, welches auf dem Mohr-Coulomb-Kriterium basiert. Die Kohäsion wird als temperaturabhängig angenommen und durch uniaxiale Hochtemperatur-Drucktests bestimmt. Der E-Modul wird ebenfalls mittels Ultraschallmessung für den gesamten betrachteten Temperaturbereich gemessen. Die irreversible kontrollierte Expansion durch Phasentransformation wird mit einer Langzeit-Hochtemperatur-Dilatometer-Messung ermittelt und die thermische Dehnung ebenfalls mittels dilatometrischer Messung bestimmt. Reibungs- und Dilatanzwinkel hingegen werden als temperaturunabhängig angenommen. Es werden Arbeitszyklen mit zwei unterschiedlichen Temperaturprogrammen simuliert: einmal mit und einmal ohne Vorheizen der Stahlpfanne [14].

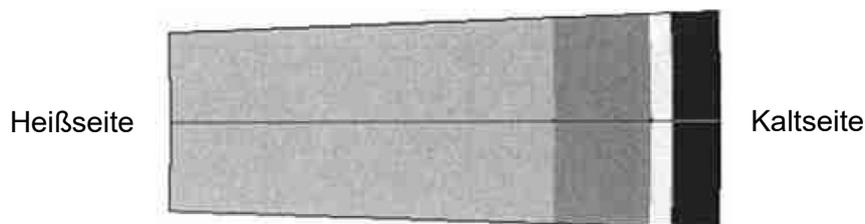


Abbildung 9: von Heiß- zur Kaltseite: Verschleißfutter, Dauerfutter, Isolierung, Stahlmantel [14]

Gründe für die Fugenöffnung sind irreversible Verformungen an der Heißseite, welche wiederum durch folgende Phänomene hervorgerufen werden [14]:

- Der Einsatz einer kalten, nicht vorgeheizten Pfanne führt zu hohen Druckspannungen im Verschleißfutter und diese können zu Druckversagen führen. Bei weiterem Temperaturanstieg öffnen sich die Fugen weiter. Bei zyklischem Einsatz der Pfanne können die Fugen als Dehnfugen dienen und ermöglichen so eine gewisse Expansion des Materials. Beim Einsatz einer Isolierungsschicht im Zustellungsaufbau wird die Fugenöffnung erhöht.
- Die Steingeometrie kann auch von Bedeutung sein. Die Expansion in vertikaler Richtung ist uneingeschränkt möglich, in Umfangsrichtung jedoch behindert. Druckversagen tritt daher vor allem in horizontaler Richtung auf. Daher können Steine

mit einem größeren Verhältnis von Höhe zu Breite vorteilhafter sein. Ein Versagen durch horizontale Risse kann durch vertikalen Dehnungsspielraum vermieden werden.

- Weisen die Materialien der Schmelzbadzone und Schlackenzone große Unterschiede im thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf, kann das eine Fugenöffnung begünstigen. Aufgrund der Reibung zwischen den Steinen tritt die Öffnung beim Material mit höherem Ausdehnungskoeffizienten auf.
- Radiale Risse können durch zu schnelles Abkühlen entstehen.
- Der Innendurchmesser der Pfanne kann sich durch die Kompressibilität der Isolierung erhöhen und dadurch zu einer Öffnung der vertikalen Fugen führen.

Die Stabilität der Zustellung wird durch die Fugenöffnung negativ beeinflusst, Druckspannungen in Umfangsrichtung hingegen tragen zur Stabilisierung bei. Offene Fugen führen zu einer Anfälligkeit gegenüber Zugversagen und können zu einem Lösen einzelner Steine führen, da keine Spannungen übertragen werden können. Die Isolierung, Dehnvorgabe, Festigkeit und E-Modul des Materials haben ebenso einen Einfluss auf die Gesamtstabilität. Einer der Hauptparameter für Stabilitätsverlust in der Zustellung ist Druckversagen in Kombination mit irreversiblen Verformungen. Die Dehnvorgabe bietet eine Möglichkeit, diesen durch Druck verursachten irreversiblen Verformungen entgegenzuwirken. Ziel der Dehnvorgabe sind geschlossene Fugen an der Heißseite während der Chargen. Eine Reduktion der Druckspannungen an der Heißseite trägt ebenso zur Reduktion der irreversiblen Verformungen bei. Dies kann durch ausreichendes Vorheizen der Pfanne vor dem Einsatz erreicht werden. Je geringer die auftretenden irreversiblen Verformungen, desto geringer kann auch die Dehnvorgabe ausfallen. [14]

Zur Untersuchung des Aufheizprogrammes ohne Vorheizen führt Gruber et al. [14] den Parameter $\sigma/(E \alpha)$ ein. Dabei ist σ die Druckfestigkeit und α der thermische Ausdehnungskoeffizient. Für relativ geringe Werte dieses Parameters gilt: Die irreversiblen Verformungen (und damit die benötigte Dehnvorgabe) sinken mit steigendem Wert dieses Parameters. bersteigt der Parameter $\sigma/(E \alpha)$ einen gewissen Wert, dreht sich dieser Trend jedoch um. Das Druckversagen an der Kaltseite des Verschleißfutters bei $\sigma/(E \alpha) > \sim 45$ wird reduziert und die thermische Expansion an der Kaltseite trägt zur Fugenöffnung an der Heißseite bei [13].

Die Dehnvorgabe stellt eine effiziente Gegenmaßnahme zur Fugenöffnung, und damit der Sensibilität gegenüber Zugspannungen, dar. Die Prozessparameter und insbesondere das Vorheizen wirken sich signifikant auf die auftretenden Spannungen und die daraus resultierende Fugenöffnung aus [14].

Gesamtbetrachtung der angeführten Publikationen

Feuerfestprodukte werden sehr vielseitig eingesetzt und die Anforderungen an sie hängen von zahlreichen Faktoren ab. Allgemein gültige Regeln für den Einsatz und für die Anwendung dieser Produkte festzulegen, ist kaum möglich. Die hier angeführten Arbeiten sollen zum besseren Verständnis der Schadensmechanismen und thermomechanischen Belastungen in der gezielten Anwendung von Feuerfestprodukten in Stahlpfannen dienen.

Die in Stahlpfannen auftretenden Thermoschocks verursachen thermische Ausdehnung des Materials, welche einerseits durch den Stahlmantel und andererseits durch die Feuerfestprodukte selbst eingeschränkt wird. Diese Einschränkung sorgt für Spannungen in der Zustellung einer Stahlpfanne, welche zur Bildung von Rissen im Feuerfestmaterial führen. Durch die zyklische Wiederholung der Thermoschocks breiten sich diese Risse immer weiter aus. Grund dafür ist die teilweise irreversible Verschiebung der Rissflächen zueinander. Diese irreversible Verschiebung ist ein wesentlicher Verschleifaktor bei durch zyklische

Belastungen beanspruchten Feuerfestprodukten. Die ungleichmäßige Temperaturverteilung, also ein Temperaturgradient in der Zustellung, führt zu ungleichmäßiger thermischer Ausdehnung und kann damit ebenfalls zu Schäden führen [7–9].

Hohe Druckspannungen in Umfangsrichtung führen zu irreversiblen Verformungen an der Heißseite und in weiterer Folge zu einer Öffnung der Fugen zwischen den Steinen des Verschleißfutters. Diese Verformungen werden vor allem durch das Phänomen des Kriechens hervorgerufen. Durch Fugenöffnung kann nicht nur flüssiger Stahl in das Verschleißfutter eindringen, sie kann auch zu Zugversagen im Verschleißfutter führen. Irreversible Verformungen in Kombination mit Druckversagen sind außerdem ein Hauptverursacher für Stabilitätsverlust der Zustellung. Die Dehnvorgabe ist dabei ein effizientes Werkzeug, um diesen irreversiblen Verformungen entgegenzuwirken. Eine optionale Isolierung als zusätzliche Schicht zwischen Dauerfutter und Stahlmantel wirkt sich signifikant auf die Temperaturverteilung und damit den Temperaturgradienten in der Zustellung aus. Diese Schicht senkt nicht nur den Wärme- und Energieverlust, sondern auch die Stahlmanteltemperatur. Die Temperatur des Verschleißfutters und damit die Druckspannungen an der Heißseite hingegen steigen an. Auch die benötigte Dehnvorgabe wird stark vom Temperaturgradienten in der Zustellung beeinflusst. Der Verlauf des Temperaturgradienten hängt wiederum von der thermischen Leitfähigkeit der unterschiedlichen Materialien ab. Radialspannungen sind verglichen mit Umfangs- und Vertikalspannungen sehr klein und daher vernachlässigbar [3, 7, 12, 14].

Die Berücksichtigung von Plastizität im Stahlmantel führt zu einer Verringerung der Spannungen in alle Richtungen. Wird Reibung zwischen den Steinen in die Simulation miteinbezogen, steigen die Spannungen im Verschleißfutter, im Stahlmantel hingegen nehmen sie ab. Verschiedene Versagensphänomene treten in verschiedenen Bereichen der Zustellung auf. Kriechversagen tritt an der Heißseite auf. Mit zunehmendem Abstand zu dieser wird Versagen durch Zugbelastung häufiger. Auch im zeitlichen Verlauf gibt es hier Unterschiede. Während des Vorheizens ist die Temperatur nicht ausreichend für Kriechverformungen, jedoch kann es bereits zu Scher- und Zugversagen kommen [12].

Eine statistische Auswertung von FEM-Simulationen versucht die Beiträge verschiedener Einflussfaktoren auf thermomechanische Größen zu quantifizieren. Die Höhe der Druckspannung im Verschleißfutter ist demnach zu etwa 90% ausschließlich auf dessen E-Modul zurückzuführen. Die auftretenden Zugspannungen im Stahlmantel werden maßgeblich von der Isolierung und dem E-Modul des Verschleißfutters bestimmt [13].

Diese Literaturrecherche soll die Vielzahl an Faktoren aufzeigen, von denen die thermomechanische Belastung auf die Zustellung einer Stahlpfanne abhängt. Eine detaillierte, individuelle Modellerstellung ist für eine aussagekräftige FEM-Analyse daher von größter Bedeutung.

2.4 Materialmodelle

Um das Verhalten von Konstruktionen bzw. einzelnen Bauteilen gegenüber äußeren Belastungen vorherzusagen, ist es erforderlich, deren Verhalten und physikalische Materialeigenschaften mit Hilfe von mathematischen Gleichungen zu beschreiben. Aus diesen mathematischen Gleichungen werden Zusammenhänge abgeleitet und daraus wiederum Materialmodelle gebildet. Da unterschiedliche Materialien verschieden auf gewisse äußere Belastungen reagieren, gibt es kein allgemein gültiges Materialmodell, sondern je nach Materialart, Einsatzgebiet, Genauigkeit und Berechnungsaufwand verschiedene Materialmodelle für den jeweiligen Anwendungsfall. Dazu wurden bereits viele Materialmodelle für unterschiedliche Einsatzbereiche entwickelt. Wird ein Bauteil unter äußerer Belastung berechnet, werden sich die Ergebnisse von mehreren Berechnungen trotz identischer Belastungen und Materialeigenschaften unterscheiden, wenn dabei unterschiedliche Materialmodelle zum Einsatz kommen. Um das Verhalten, insbesondere das Versagensverhalten, eines Bauteils oder einer Konstruktion gegenüber einer Belastung berechnen zu können, ist es daher essenziell, das für die jeweilige Aufgabenstellung am besten geeignete Materialmodell zu finden.

Im Falle von Feuerfestmaterialien in Stahlpfannen ist vor allem das Versagen aufgrund irreversibler Verformungen von Bedeutung. Dazu gibt es im Programm ABAQUS mehrere vordefinierte Materialmodelle, die plastisches Verhalten beschreiben [11]:

- Concrete Damaged Plasticity
- Concrete Smeared Cracking
- Drucker Prager
- Mohr Coulomb Plasticity
- Soft Rock Plasticity
- Von MisesCreep

Abgesehen von den im Programm standardmäßig verfügbaren Materialmodellen ist es zusätzlich möglich, Simulationen mit benutzerdefinierten Modellen zu berechnen. Die in dieser Arbeit verwendeten Materialmodelle sind das lineare Drucker-Prager-Modell, von-Mises-Kriechen und eine vom Lehrstuhl Gesteinshüttenkunde der Montanuniversität Leoben eigens entwickelte ABAQUS user subroutine.

Maßgebend ist die Grenze des elastischen Verhaltens eines Materials bei einem gegebenen Spannungszustand. Diese Grenze wird durch ein Fließkriterium beschrieben und bei einem Überschreiten dieses Kriteriums tritt plastisches Verhalten auf. Diese Grenze kann im dreidimensionalen Hauptspannungsraum als Fließfläche dargestellt werden [15].

2.4.1 Von-Mises-Kriechen [16]

Unter Kriechen versteht man die zeitabhängige Verformung eines Materials unter konstanter Last, oft in Kombination mit erhöhten Temperaturen. Die Kriechverformung ist daher eine Funktion der Zeit, der Spannung und der Temperatur. In numerischen Modellen wird Kriechen mittels *time hardening* oder *strain hardening* beschrieben [11, 16, 17].

Die äquivalente uniaxialen Kriechdehnrate $\dot{\varepsilon}^{cr}$ ist entsprechend der *time-hardening*-Beschreibung in Glg. (1) ersichtlich:

$$\dot{\varepsilon}^{cr}(t) = A\sigma_{vM}^n t^m \quad (1)$$

- $\dot{\varepsilon}^{cr}(t)$ zeitabhängige Kriechdehnrate [s⁻¹]
- σ_{vM} Vergleichsspannung nach von Mises [MPa]
- A..... temperaturabhängiger Materialbeiwert [MPa⁻ⁿs⁻¹]
- t Zeit [s]
- m Exponent [-]
- n Exponent [-]

Da zu Heizbeginn die Temperaturen gering sind und daher kein Kriechen auftritt und sich außerdem die Spannungen laufend verändern, wird für Zustellungssimulationen der *strain-hardening*-Ansatz nach Glg. (2) verwendet [11]:

$$\dot{\varepsilon}^{cr}(\varepsilon^{cr}) = [A\sigma_{vM}^n ((m + 1)\varepsilon^{cr})^{\frac{1}{m+1}}] \quad (2)$$

- $\dot{\varepsilon}^{cr}(\varepsilon^{cr})$ dehnungsabhängige Kriechdehnrate [s⁻¹]
- ε^{cr} Kriechdehnung [-]
- σ_{vM} Vergleichsspannung nach von Mises [MPa]
- A..... temperaturabhängiger Materialbeiwert [MPa⁻ⁿs⁻¹]
- t Zeit [s]
- m Exponent [-]
- n Exponent [-]

2.4.2 Fließkriterium nach Drucker-Prager [18]

Im Gegensatz zum Fließkriterium nach von Mises werden beim Fließkriterium nach Drucker-Prager nicht nur die deviatorischen Spannungen q (Glg. (4)), sondern auch hydrostatische Spannungen p (Glg. (5)) miteinbezogen. Es eignet sich daher auch für Materialien, mit von p abhängigen Fließbeginn. Dieses Kriterium wird häufig für Materialien wie Beton, Boden und Fels verwendet [11, 15, 18]:

$$f(\sigma) = q + p \cdot \tan \beta - c = 0 \quad (3)$$

mit $q = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3}$ (4)

und $p = -\frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ (5)

- q Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]
- p Hydrostatischer Druck [MPa]
- β Reibungswinkel [°]
- c Kohäsion [MPa]

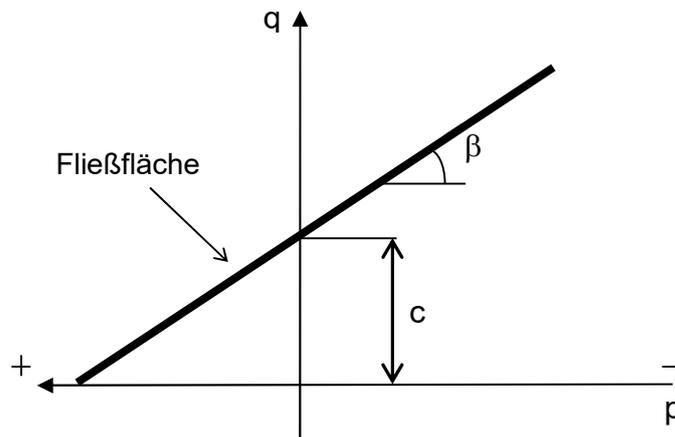


Abbildung 10: Drucker-Prager Fließfläche

2.4.3 Subroutine des Lehrstuhls Gesteinshüttenkunde

Bei Aggregaten in industrieller Anwendung, wie zum Beispiel der Stahlpfanne, können mehrere Versagensmechanismen gleichzeitig auftreten und beeinflussen sich gegenseitig. Daher ist es von Vorteil, bereits in der Finite Elemente Simulation Materialmodelle zu verwenden, welche mehrere Versagensmechanismen kombinieren.

Das kommerzielle Softwarepaket ABAQUS bietet mit dem Drucker-Prager-Kriechmodell (DPC) diese Möglichkeit. Das DPC-Modell vereint Scher- und Kriechversagen in der Berechnung mit der Einschränkung, dass das Kriechversagen nur in einem Bereich zwischen der Drucker-Prager-Versagensfläche und einer Parallelen der äquivalenten Kriechfläche durch den Ursprung berücksichtigt wird (untere Grenzkriechfläche). Darunter wird das Kriechen im DPC-Modell nicht berücksichtigt (Abbildung 11) [11].

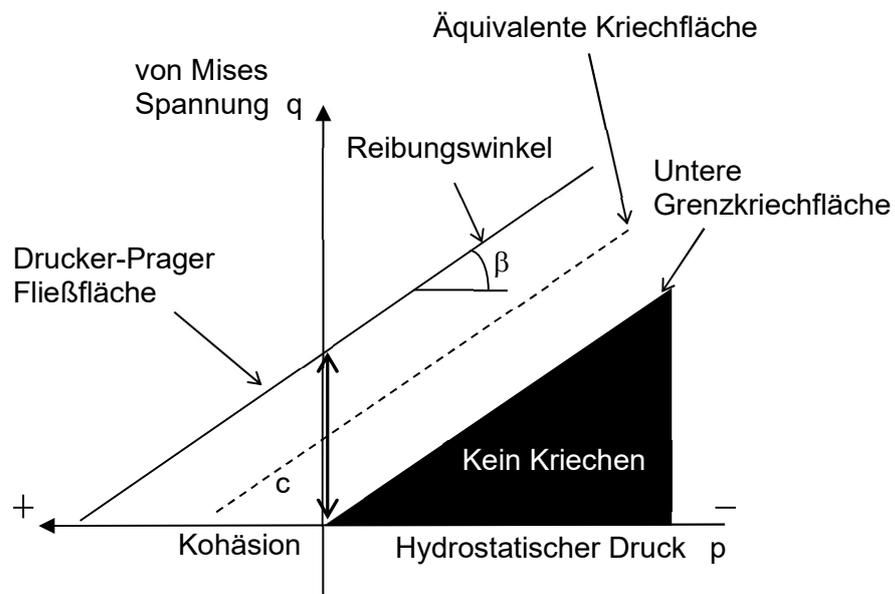


Abbildung 11: Graphische Darstellung des Abaqus Drucker-Prager Kriechmodell [11]

Experimentelle Ergebnisse haben jedoch gezeigt, dass Kriechen auch im Bereich unter der Parallelen der äquivalenten Kriechfläche durch den Ursprung (schwarzer Bereich, Abbildung 11) auftritt. Daher wurde am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde ein Materialmodell entwickelt, das volles Kriechen unter der Drucker-Prager-Versagensfläche berücksichtigt (Abbildung 12). Das sogenannte modifizierte Drucker-Prager-Kriechmodell (MDPC) kombiniert das Drucker-Prager-Versagenskriterium mit dem Von-Mises-Kriechmodell. Scherversagen tritt an der Drucker-Prager-Versagensfläche und Kriechen im gesamten Bereich darunter auf [19].

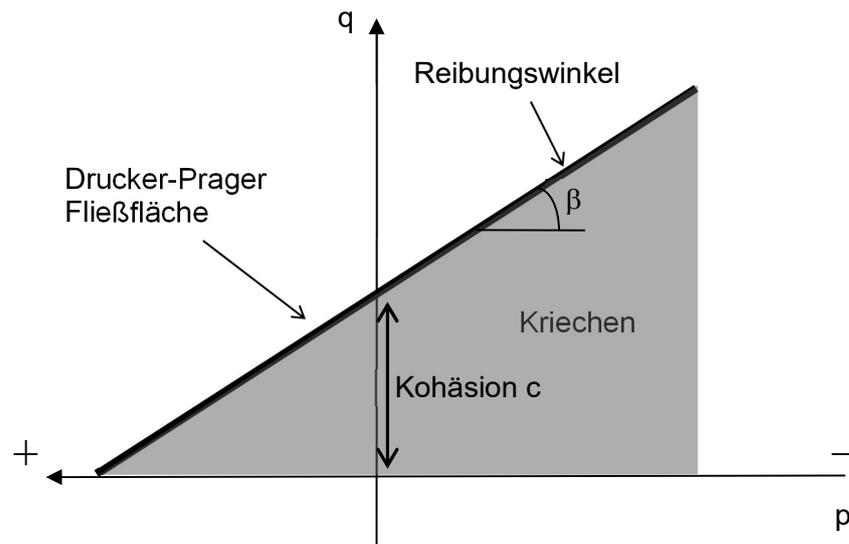


Abbildung 12: Grafische Darstellung des modifizierten Drucker-Prager-Kriechmodelles [19]

3 Durchführung der Untersuchungen

In dieser Arbeit wird eine Stahlpfannenzustellung, genauer die Zustellung der Schlackenzzone, betrachtet. Die Schlackenzonenzustellung hat einen dreischichtigen Aufbau, bestehend aus einem MgO-C-Stein als Verschleißfutter, einer Hochtonerdemasse als Dauerfutter und einer Isolierung.

3.1 2D-Einheitszellenmodell

Bevor der im vorherigen Absatz beschriebene Zustellungsaufbau thermomechanisch analysiert wird, erfolgt eine rein thermische Simulationsreihe mit 2D-Einheitszellenmodellen. Zweck dieser zweidimensionalen Untersuchung ist die Festlegung einer Obergrenze der Isolierungsstärke für die späteren 3D-Simulationen. Dadurch kann die Anzahl der 3D-Modelle, welche mit erheblichem Simulationsaufwand verbunden sind, reduziert werden. Das 2D-Einheitszellenmodell ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Schichtstärken des Standardmodells sind 124 mm für das Verschleißfutter, 101 mm Dauerfutter, 6 mm Isolierung und 30 mm Stahlmantel. Für alle Schichten des 2D-Modelles wird der Elementtyp DC2D4 verwendet, ein linearer Elementtyp mit 4 Knoten für Wärmeleitung. Die Elementgröße des Standardmodells beträgt im Verschleiß- und Dauerfutter 7 x 7 mm, in der Isolierung 3 x 3 mm und im Stahlmantel 5 x 5 mm.

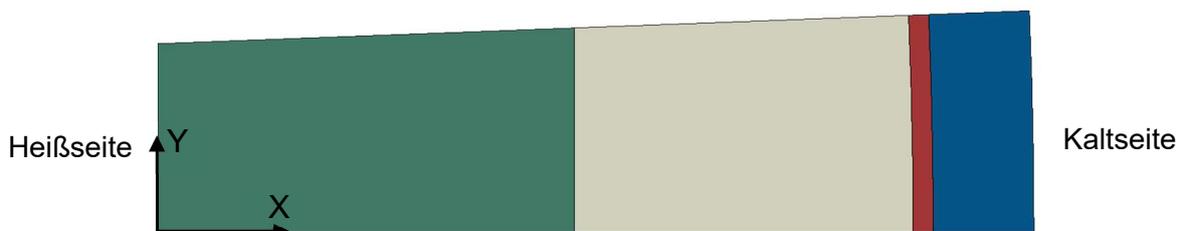


Abbildung 13: 2D-Standardmodell mit 124 mm Verschleißfutter, 101 mm Dauerfutter, 6 mm Isolierung und 30 mm Stahlmantel (Von Heiß- zur Kaltseite)

3.1.1 Randbedingungen

Die thermischen Randbedingungen und Voraussetzungen sind identisch mit denen des 3D-Einheitszellenmodells und können unter Punkt 3.2.1 nachgelesen werden. Mechanische Restriktionen sind aufgrund des rein thermischen Aspekts dieser Untersuchung irrelevant.

3.2 3D- Einheitszellenmodell

Basierend auf der beschriebenen Schlackenzonenzustellung wurde im FEM-Softwarepaket ABAQUS ein 3D-Einheitszellenmodell erstellt. Um den rechnerischen Aufwand zu minimieren, werden die Symmetrien des MgO-C-Steines des Verschleißfutters ausgenutzt und das Modell auf ein Viertel der Steinabmessungen reduziert. Das Einheitszellenmodell ist in Abbildung 14 ersichtlich und hat die folgenden Schichtstärken: 124mm Verschleißfutter, 101mm Dauerfutter, 6mm Isolierung, 30mm Stahlmantel und wird als Standardmodell bezeichnet. Die Dehnvorgabe in Umfangsrichtung des Standardmodelles für das Verschleißfutter beträgt 0,2 mm und ist mit Hilfe einer unendlich steifen Platte („rigid plate“) ausgeführt. Für das gesamte 3D-Einheitszellenmodell wurde der Elementtyp C3D8T verwendet, ein Element mit 8 Knoten und gekoppelter Temperatur und Verschiebung. Wie auch im 2D-Modell beträgt die Elementgröße des Standardmodells im Verschleiß- und Dauerfutter 7 mm, in der Isolierung 3 mm und im Stahlmantel 5 mm.

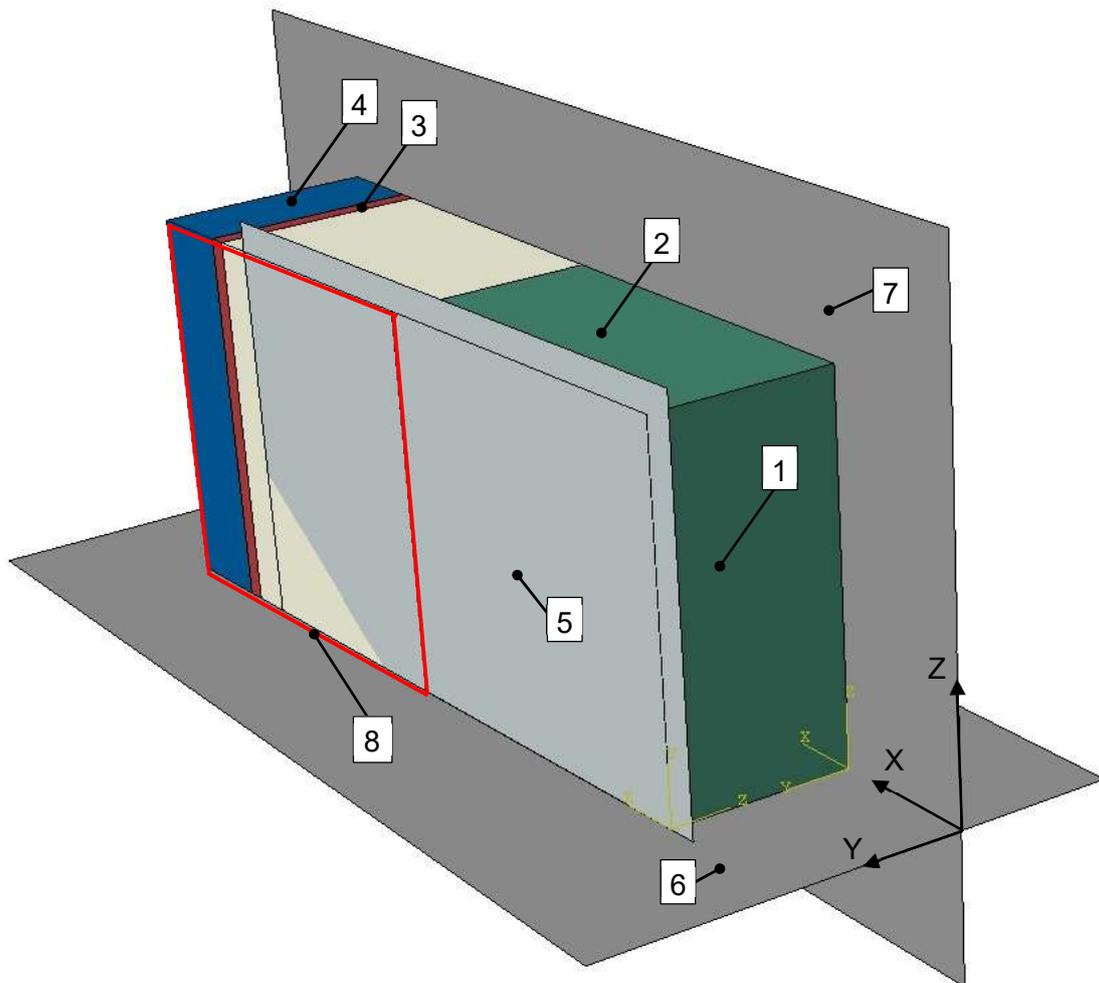


Abbildung 14: 3D-Standardmodell; 1 = Verschleißfutter, 2 = Dauerfutter, 3 = Isolierung, 4 = Stahlmantel, 5 = Rigid, 6 = horizontale Symmetrieebene X-Y, 7 = vertikale Symmetrieebene X-Z, 8 = Keilebene

3.2.1 Randbedingungen

Das 3D-Einheitszellenmodell erfordert einige mechanische und thermische Randbedingungen. Der Teil (5) *Rigid* stellt die halbe tatsächliche Dehnvorgabe dar und ist in allen Freiheitsgraden beschränkt, also vollständig eingespannt, und verhindert so eine etwaige Ausdehnung des Verschleißfutters, welche die Dehnvorgabe übersteigt. Diese Einschränkung ist nur für das Verschleißfutter notwendig, da die restlichen Schichten monolithischer Natur sind und daher keine Fugen aufweisen. Jedoch wird hier eine Bewegung der Keiffläche in y-Richtung verhindert. Für das gesamte Modell ist eine Bewegung in Richtung der beiden Symmetrieebenen (grau in Abbildung 14 und Abbildung 15) unterbunden. An der Heißseite des Verschleißfutters wird eine Belastung von 0,01 MPa aufgebracht. Diese ist notwendig, um den Stein in Position zu halten und die Stabilität des Systems zu verbessern. Die Einschränkungen der jeweiligen Bereiche und die Belastung auf das Verschleißfutter sind in Abbildung 15 ersichtlich.

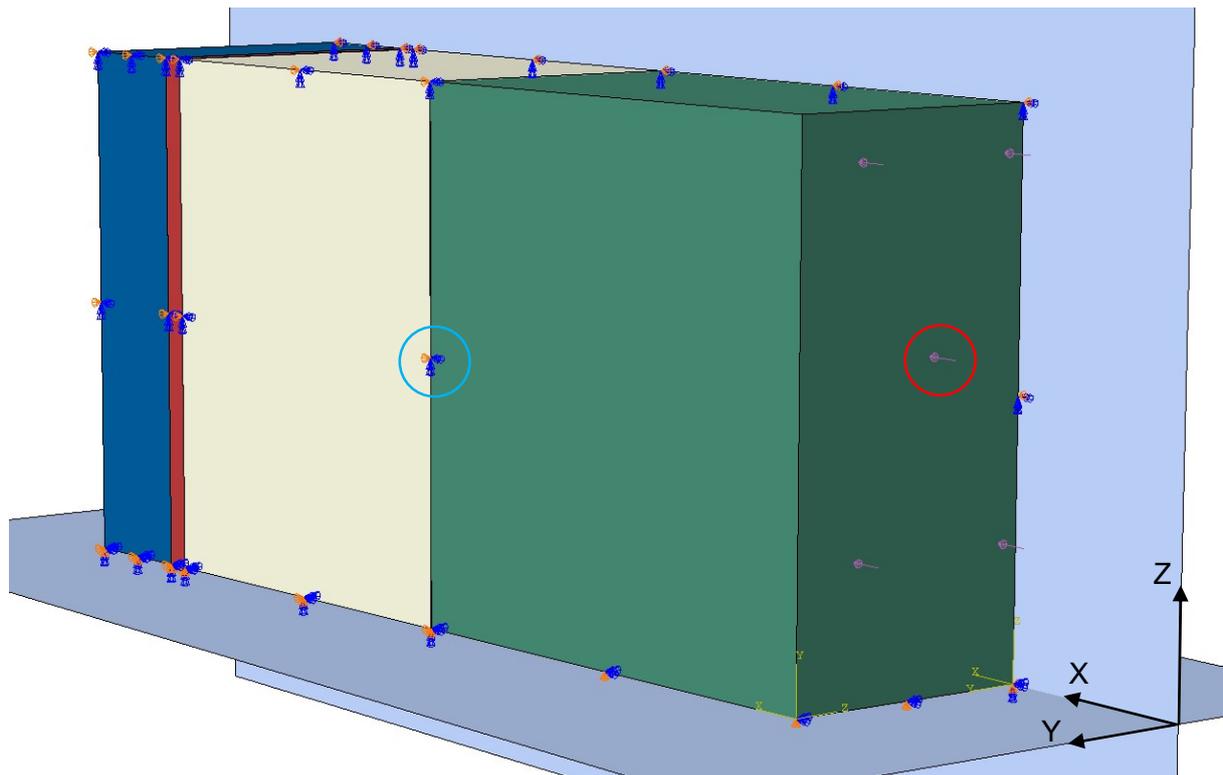


Abbildung 15: Randbedingungen des Modells: die Pfeile (rot eingekreist) an der Heißseite stellen die Auflast von 0,01 MPa dar, orange Pfeile (blau eingekreist) stehen für eine eingeschränkte Verschiebung, blaue Doppelpfeile (blau eingekreist) stellen eine eingeschränkte Rotation dar.

Die Kontaktfläche zwischen zwei Schichten wird als reibungsloser, harter Kontakt mit vollständigem Wärmeübergang simuliert. Die Umgebungstemperatur wird mit 20°C als konstant angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient α_1 zwischen Stahlmantel und Umgebung ist temperaturabhängig und beträgt zwischen 10 und 400 W/m²K. Zwischen Verschleißfutter und dem Pfanneninneren ist der Wärmeübergang α_2 ebenfalls temperaturabhängig und beträgt zwischen 10 und 3052,3 W/m²K. Der Wärmeübergang zwischen Verschleißfutter und Flüssigstahl α_3 ist mit 50000 W/m²K konstant. Die Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten α sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Wärmeübergangskoeffizienten

T_1 [°C]	α_1 [W/m ² K]	T_2 [°C]	α_2 [W/m ² K]	T_3 [°C]	α_3 [W/m ² K]
-10	10	-20	10	1500	50.000
50	10	150	60		
150	15	250	99		
250	21	350	149,9		
350	27	400	181,1		
400	32	650	409,5		
650	50	700	472,3		
700	70	800	617,8		
1000	140	1000	998,5		
2000	400	1200	1517		
		2000	3052,3		

3.3 Materialparameter

In Tabelle 2 sind die in das Modell implementierten Materialparameter der Werkstoffe der Schlackenzonenzustellung in Abhängigkeit der Temperatur zusammengefasst. Diese wurden aus anderen laufenden Arbeiten am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde zur Verfügung gestellt bzw. aus Literaturquellen übernommen.

Tabelle 2: Materialparameter der verwendeten Werkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur

	Stein MgO-C	Feuerbeton	Isolierung	Stahlmantel
	mechanisch			
Dichte [kg/m ³] ¹	3070	2950	1000	7600
E-Modul [GPa] [14]	³ 31 – 50	20	0,17	210
Poisson Zahl [-]	0,2	0,2	0,2	0,3
	thermisch			
Wärmedehnung [K ⁻¹] ¹	³ 7,5 – 10,6·10 ⁻⁶	7,00·10 ⁻⁶	6,00·10 ⁻⁶	1,20·10 ⁻⁵
Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)] ¹	7,5	3	0,15	50
spez. Wärmekapazität [J/(kgK)]	1000	1000	1000	1000
Reibungswinkel [20]	49,2°			
Dilatanzwinkel [20]	18°			
Kohäsion [MPa] [14]	³ 5 - 40			
Norton-Bailey-Kriechparameter [21]				
Temperatur [°C]	A [MPa ⁻ⁿ s ^{-1-m}]	n [-]	m [-]	
² 800	1,00·10 ⁻²⁰	0,8039	-0,8039	
² 900	2,11·10 ⁻⁷	0,8039	-0,8039	
² 1000	2,11·10 ⁻⁶	0,8039	-0,8039	
² 1070	2,11·10 ⁻⁵	0,8039	-0,8039	
1270 [21]	2,73·10 ⁻⁵	0,8039	-0,8039	
1370 [21]	2,85·10 ⁻⁵	0,8039	-0,8039	
1470 [21]	3,12·10 ⁻⁵	0,8039	-0,8039	

¹ Daten aus Produktdatenblättern von Industriepartnern

² Daten extrapoliert aus Ergebnissen bei höheren Temperaturen

³ Werte sind temperaturabhängig

3.4 Temperaturprogramm

Das simulierte Temperaturprogramm wird in vier Schritte unterteilt. Das Aufheizen, Thermoschock/Charge, Abkühlen für 1,5 Stunden (entspricht der Standzeit bis zur nächsten Charge) und im Anschluss Abkühlen für weitere 15,2 Stunden. Im 1. Schritt Aufheizen, wird die Pfanne innerhalb von 40,5 Stunden langsam von 20°C auf 1100°C aufgeheizt, um eine ausreichende Austrocknung der Zustellung sicherzustellen. Erfolgt das erste Aufheizen der Pfanne zu schnell, kann die Feuchtigkeit nicht vollständig entweichen. Dadurch bilden sich enorme Dampfdrücke innerhalb der Zustellung, welche zu einem Abplatzen der Feuerfestprodukte führen können. Im 2. Schritt Temperaturschock/Charge wird die Heißseite der Zustellung einer Temperatur von 1500°C ausgesetzt und erreicht diese selbst innerhalb von 120 Sekunden, damit wird eine Befüllung mit Flüssigstahl simuliert. Diese Temperatur wird für 1,58 Stunden gehalten. Danach kommt es produktionsbedingt zu Standzeiten der Pfanne bis zur nächsten Charge, wobei die Pfanne abgedeckt stehen gelassen wird. Dieser Vorgang wird im 3. Schritt Abkühlen für 1,5h simuliert. Die Wärme wird dabei nur über den Stahlmantel an die Umgebung (20°C) abgeführt. Im simulierten Schritt 4 wird das vollständige Abkühlen der Pfannen am Ende einer Pfannenreise simuliert. In der Praxis umfasst ein Arbeitszyklus die Schritte 1 bis 3. Das Ende des 3. Schrittes (Gesamtzeit 43,63 h) wird daher auch als Zyklusende bezeichnet. Schritt 4 erfolgt nur, wenn die Pfanne ihre Lebensdauer erreicht hat und nicht weiter eingesetzt wird. Das Temperaturprogramm ist in Diagramm 1 und Tabelle 3 dargestellt.

Diagramm 1: Temperaturverlauf an der Heißseite der Zustellung

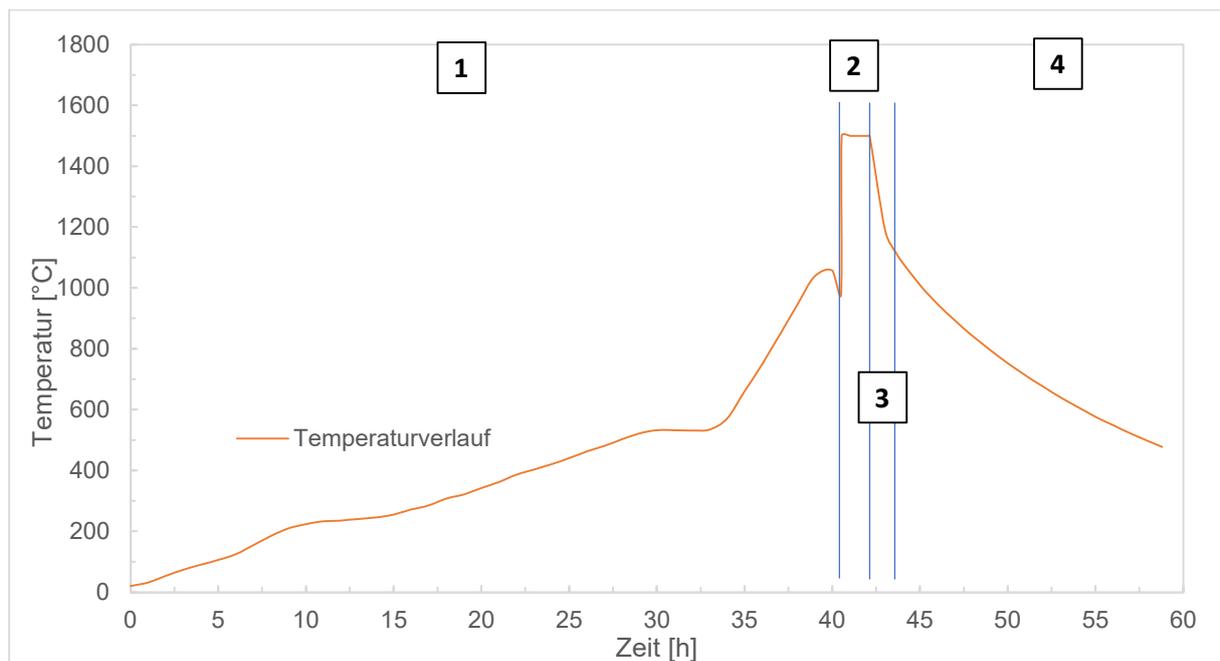


Tabelle 3: Zusammenfassung der einzelnen Schritte des Temperaturverlaufs

Schritt	max. Temperatur Heißseite [°C]	Zeit je Schritt [h]	Gesamtzeit [h]
1. Vorheizen	1100	40,55	40,55
2. Thermoschock/Charge	1500	1,58	42,13
3. Abkühlen 1,5h		1,50	43,63
4. Abkühlen Ende		15,17	58,80
Summe		58,80	

3.5 Zeitinkrementation

Die Grundeinstellungen für alle vier Schritte der Simulation sind ident und im Folgenden aufgelistet:

- Instationäres Verhalten
- Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität
- Keine automatische Stabilisation
- Explizite oder implizite Integration des Kriechens

Die Inkrementation der einzelnen Schritte variiert aufgrund der automatischen Zeitinkrementation. Die maximale Inkrementanzahl, Grenzen der Inkrementgröße sowie die maximale Temperaturänderung je Inkrement und die Dehnungsfehlertoleranz können jedoch manuell festgelegt werden und ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Zeitinkrementation der vier Simulationsschritte

	Schritt 1 Aufheizen	Schritt 2 Temperatur- schock	Schritt 3 Abkühlen 1,5h	Schritt 4 Abkühlen Ende
Max. Inkrementanzahl	10.000	10.000	1.000	10.000
Inkrementgröße [s] (Anfangswert Minimum Maximum)	0,1 10^{-5} 500	0,1 10^{-5} 20	0,1 10^{-5} 50	0,1 10^{-5} 300
Max. Temperaturänderung je Inkrement [°C]	50	100	100	100
Dehnungsfehler- toleranz	0,001	0,001	0,001	0,001

3.6 Aufbau des Simulationsprogrammes

Eine Veränderung der Fugenstärke zwischen zwei Steinen des Verschleißfutters, also der Dehnvorgabe, wirkt sich maßgeblich auf die Spannungsverteilung in der gesamten Zustellung aus. Eine mögliche Isolierung und deren Dicke hat einen erheblichen Einfluss auf die Temperaturverteilung in der Zustellung und damit auf die unterschiedlichen thermischen Dehnungen, welche sich wiederum auf die Spannungsverteilung auswirken. In dieser Arbeit wird der Einfluss dieser beiden Parameter untersucht. Dazu wird einerseits die Dehnvorgabe und andererseits die Isolierungsstärke variiert. Weiters werden diese thermomechanischen Simulationen auf Basis drei verschiedener Materialmodelle (Kapitel 2.4.1 - 2.4.3) durchgeführt.

3.6.1 Variation der Isolierungsstärke im 2D-Einheitszellenmodell

Anhand von 2D-Modellen (3.1, Seite 22) wird eine rein thermische Analyse durchgeführt. Ziel dieser Analyse ist die Definition einer maximalen Isolierungsstärke, um die Anzahl der 3D-Analysen zu reduzieren. Um die Veränderung der Temperaturverteilung aufgrund der Isolierungsstärke zu bestimmen, wird diese schrittweise von 0 mm auf 12 mm erhöht. Wie später in den Ergebnissen zu sehen sein wird, wirkt sich eine weitere Erhöhung (> 12 mm) nur mehr gering auf die Temperaturverteilung aus, weshalb 12 mm als maximale Isolierungsstärke definiert wurde. Dadurch ergeben sich 13 Modelle (Tabelle 5).

Tabelle 5: 2D-Modelle mit variierender Isolierungsstärke für eine rein thermische Analyse
 VF = Verschleißfutter, DF = Dauerfutter, Iso = Isolierung, SM = Stahlmantel

Modellbezeichnung 2D-Modelle	Schichtdicke [mm]			
	VF	DF	Iso	SM
2D_2P10_Iso0	124	107	0	30
2D_2P10_Iso1	124	106	1	30
2D_2P10_Iso2	124	105	2	30
2D_2P10_Iso3	124	104	3	30
2D_2P10_Iso4	124	103	4	30
2D_2P10_Iso5	124	102	5	30
2D_2P10_Iso6	124	101	6	30
2D_2P10_Iso7	124	100	7	30
2D_2P10_Iso8	124	99	8	30
2D_2P10_Iso9	124	98	9	30
2D_2P10_Iso10	124	97	10	30
2D_2P10_Iso11	124	96	11	30
2D_2P10_Iso12	124	95	12	30

3.6.2 Variation der Dehnvorgabe im 3D-Einheitszellenmodell

Zunächst wird der Einfluss einer sich verändernden Dehnvorgabe untersucht. Dazu wird das Standardmodell (Kapitel 3.2, Seite 22) mit einer Isolierungsstärke von 6 mm herangezogen. Bei diesem Standardmodell mit gleichbleibenden Schichtdicken wird nun die Dehnvorgabe schrittweise von 0,2 mm auf 0,8 mm erhöht. Jedes entstehende Modell wird dabei mit den drei zuvor genannten Materialmodellen simuliert. In Tabelle 6 sind die so entstehenden 15 verschiedenen Modelle aufgelistet.

Tabelle 6: Modellreihe mit konstanter Isolierungsstärke und variierender Dehnvorgabe
 VF = Verschleißfutter, DF = Dauerfutter, Iso = Isolierung, SM = Stahlmantel

Materialmodell	Modellbezeichnung	Dehnvorgabe [mm]	Schichtdicke [mm]			
			VF	DF	Iso	SM
Drucker-Prager	2P10_DP_Iso6_J0,2	0,20	124	101	6	30
	2P10_DP_Iso6_J0,4	0,40	124	101	6	30
	2P10_DP_Iso6_J0,5	0,50	124	101	6	30
	2P10_DP_Iso6_J0,6	0,60	124	101	6	30
	2P10_DP_Iso6_J0,8	0,80	124	101	6	30
Von-Mises-Kriechen	2P10_vMCreep_Iso6_J0,2	0,20	124	101	6	30
	2P10_vMCreep_Iso6_J0,4	0,40	124	101	6	30
	2P10_vMCreep_Iso6_J0,5	0,50	124	101	6	30
	2P10_vMCreep_Iso6_J0,6	0,60	124	101	6	30
	2P10_vMCreep_Iso6_J0,8	0,80	124	101	6	30
Subroutine des Lehrstuhls GHK	2P10_SubMDPC_Iso6_J0,2	0,20	124	101	6	30
	2P10_SubMDPC_Iso6_J0,4	0,40	124	101	6	30
	2P10_SubMDPC_Iso6_J0,5	0,50	124	101	6	30
	2P10_SubMDPC_Iso6_J0,6	0,60	124	101	6	30
	2P10_SubMDPC_Iso6_J0,8	0,80	124	101	6	30

3.6.3 Variation der Isolierungsstärke im 3D-Einheitszellenmodell

In einer weiteren Simulationsserie werden nun die thermomechanischen Auswirkungen einer sich verändernden Isolierungsstärke untersucht. Die Dehnvorgabe von 0,2 mm bleibt dabei konstant. Die schrittweise Änderung der Isolierungsstärke (0–12 mm) wird durch das Dauerfutter ausgeglichen, sodass die Gesamtdicke der Zustellung von 261 mm unverändert und damit das Fassungsvermögen der Stahlpfanne konstant bleibt. Wieder werden drei Materialmodelle angewandt, wodurch 15 weitere Modelle entstehen. Diese sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die Kombinationen aus Isolierungsstärke und Dehnvorgabe der drei grau hinterlegten Modelle decken sich jedoch mit Modellen, die bereits unter Punkt 3.6.2 (Tabelle 6) angeführt werden und stellen somit keine neuen Modelle dar.

Tabelle 7: Modellreihe mit konstanter Dehnvorgabe (0,2 mm) und variierender Isolierungsstärke. VF = Verschleißfutter, DF = Dauerfutter, Iso = Isolierung, SM = Stahlmantel

Materialmodell	Modellbezeichnung	Dehnvorgabe [mm]	Schichtdicke [mm]			
			VF	DF	Iso	SM
Drucker-Prager	2P10_DP_Iso0_J0,2	0,20	124	107	0	30
	2P10_DP_Iso3_J0,2	0,20	124	104	3	30
	2P10_DP_Iso6_J0,2	0,20	124	101	6	30
	2P10_DP_Iso9_J0,2	0,20	124	98	9	30
	2P10_DP_Iso12_J0,2	0,20	124	95	12	30
Von-Mises-Kriechen	2P10_vMCreep_Iso0_J0,2	0,20	124	107	0	30
	2P10_vMCreep_Iso3_J0,2	0,20	124	104	3	30
	2P10_vMCreep_Iso6_J0,2	0,20	124	101	6	30
	2P10_vMCreep_Iso9_J0,2	0,20	124	98	9	30
	2P10_vMCreep_Iso12_J0,2	0,20	124	95	12	30
Subroutine des Lehrstuhls GHK	2P10_SubMDPC_Iso0_J0,2	0,20	124	107	0	30
	2P10_SubMDPC_Iso3_J0,2	0,20	124	104	3	30
	2P10_SubMDPC_Iso6_J0,2	0,20	124	101	6	30
	2P10_SubMDPC_Iso9_J0,2	0,20	124	98	9	30
	2P10_SubMDPC_Iso12_J0,2	0,20	124	95	12	30

Insgesamt ergeben sich somit 40 Modelle, welche im Zuge dieser Arbeit mit dem FEM-Programm ABAQUS simuliert und ausgewertet werden.

3.7 Auswertungsschema

Die Lebensdauer einer Stahlpfannenzustellung wird maßgeblich von der Lebensdauer des Verschleißfutters bestimmt. Die Belastungen in diesem Bereich sind daher von besonderem Interesse. Dazu werden die Maximalwerte für Druck- und Zugspannungen sowohl in Umfangsrichtung y ($\sigma_{Zmax,VF,y}$, $\sigma_{Dmax,VF,y}$) als auch in Vertikalrichtung z ($\sigma_{Zmax,VF,z}$, $\sigma_{Dmax,VF,z}$) aus den Ergebnissen der Simulationen ausgewertet. Zum besseren Verständnis der Spannungsverteilung wird nicht nur die Maximalspannung betrachtet, sondern der Spannungsverlauf über die gesamte Zustellungsstärke zum Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Druckspannung ($\sigma_{Dmax,SL,y}$). Der Stahlmantel ist wesentlich für die Stabilität der gesamten Stahlpfanne. Hier stellen die Zugspannungen in Umfangsrichtung y ($\sigma_{Zmax,SM,y}$) die größten Belastungen dar. Auch der zeitliche Verlauf des Spannungszustandes in Umfangs- und Vertikalrichtung ($\sigma_{y,3592}$, $\sigma_{z,3592}$) in der Mitte der Heißseite (Knotenpunkt 3592) wird ausgewertet. Die Positionen der erwähnten Knotenpunkte sind in Abbildung 16 auf Seite 32 dargestellt.

Wie in früheren Arbeiten bereits mehrfach aufgezeigt wurde, sind irreversible Verformungen verantwortlich für die Öffnung von Fugen und ein Hauptparameter für verfrühten Verschleiß von Feuerfestprodukten. Offene Fugen können nicht nur zum Lösen von Steinen führen, sie können auch Zugversagen verursachen. Dies führt wiederum zur Rissbildung und in weiterer Folge zu einem vorzeitigen Verschleiß der Feuerfestprodukte. Die FEM-Simulationen werden daher auch anhand der plastischen Dehnungen $\epsilon_{pl,y,VF}$ (Drucker-Prager Modelle), Kriechdehnungen $\epsilon_{cr,y,VF}$ (Kriech Modelle) bzw. der Kombination daraus $\epsilon_{Sub,y,VF}$ (Subroutine Modelle) ausgewertet. Die Dehnungen werden dabei an zwei Punkten betrachtet: zum einen in der Steinmitte (Knotenpunkt 3592) und zum anderen in halber Höhe am Steinrand (Knotenpunkt 343). Bei Letzterem sind die maximalen Dehnungen zu erwarten.

Die maximalen Fugenöffnungen treten am Ende des Schrittes *Abkühlen Ende* auf. In der Praxis kommt es allerdings nach dem Schritt *Abkühlen 1,5h* zu einer erneuten Charge. Das vollständige Abkühlen im 4. Schritt kommt wie in Kapitel 3.4 beschrieben nur am Ende der Pfannenreise vor. Für die Praxis ist daher die Fugenöffnung entlang der halben Steinhöhe am Ende des 3. Schrittes *Abkühlen 1,5h* ($C_{open,Ende}$) relevant.

Der Einfluss der Isolierung wirkt sich vor allem auf die Temperaturverteilung in der Zustellung aus. Je höher die Temperatur an der Heißseite am Ende des Schrittes *Abkühlen 1,5h* ist, desto geringer ist der Thermoshock. Dadurch kann Energie eingespart werden. Die Stahlmanteltemperatur ist ebenfalls von Interesse, da die Festigkeit des Stahles davon abhängt und man Rückschlüsse auf den Wärmeverlust ziehen kann. Je geringer die Stahltemperatur, desto weniger Wärme bzw. Energie geht verloren. Die Temperatur an der Heißseite ($T_{HS,Ende}$) als auch an der Kaltseite, also am Stahlmantel ($T_{SM,Ende}$), wird daher ebenfalls ausgewertet.

Aus der elastischen Energie kann man Rückschlüsse auf die Gesamtbelastung und die elastische Verformung einer Schicht ziehen. Die maximale elastische Energie im Verschleißfutter ($E_{el,max,VF}$) sowie im Stahlmantel ($E_{el,max,SM}$) ist daher ebenfalls von Interesse.

In Tabelle 8 sind die ausgewählten Parameter nochmals zusammengefasst und aufgelistet.

Tabelle 8: Ausgewählte Parameter für die Auswertung der FEM-Simulationen (die Positionen der Knotenpunkte sind in Abbildung 16 auf der Folgeseite ersichtlich)

$\sigma_{Zmax,VF,y}$	max. Zugspannung in Umfangsrichtung, Stahlmantel
$\sigma_{Dmax,VF,y}$	max. Druckspannung in Umfangsrichtung, Verschleißfutter
$\sigma_{Zmax,VF,z}$	max. Zugspannung in vertikaler Richtung, Verschleißfutter
$\sigma_{Dmax,VF,z}$	max. Druckspannung in vertikaler Richtung, Verschleißfutter
$\sigma_{Zmax,SM,y}$	max. Zugspannung in Umfangsrichtung, Stahlmantel
$\sigma_{y/z,3592}$	Spannungszustand in Heißseitenmitte (Knoten 3592) in Umfangs- bzw. Vertikalrichtung
$\sigma_{Dmax,SL,y}$	Spannungsverlauf zum Zeitpunkt t ($\sigma_{Dmax,VF,y}$) entlang der Symmetrielinie in Steinmitte
$\epsilon_{cr,y,VF,343/3592}$	Kriechdehnung in Umfangsrichtung im Knoten 343 bzw. 3592
$\epsilon_{pl,y,VF,343/3592}$	Plastische Dehnung in Umfangsrichtung im Knoten 343 bzw. 3592
$\epsilon_{Sub,y,VF,343/3592}$	Plastische Dehnung in Umfangsrichtung im Knoten 343 bzw. 3592
$C_{open,Ende}$	Fugenöffnung in halber Steinhöhe am Ende des 3. Schrittes
$E_{el,max,VF}$	max. elastische Energie, Verschleißfutter
$E_{el,max,SM}$	max. elastische Energie, Stahlmantel
$T_{HS,Ende}$	Temperatur der Heißseite am Chargenende
$T_{SM,Ende}$	Temperatur des Stahlmantels am Chargenende

4 Ergebnisse, Interpretation und Schlussfolgerungen

Die in Kapitel 3.6 angeführten 40 Modelle werden mit dem FEM-Softwarepaket simuliert und anhand Kapitel 3.7 ausgewertet.

Im Materialmodell *MDPC-Subroutine* des Lehrstuhls Gesteinshüttenkunde wurde die elastische Energie für das Verschleißfutter $E_{el,max,VF}$ nicht programmiert und kann daher nicht ausgewertet werden.

Zur besseren Orientierung werden in Abbildung 16 bzw. Tabelle 9 relevante Punkte im 3D-Einheitszellenmodell benannt.

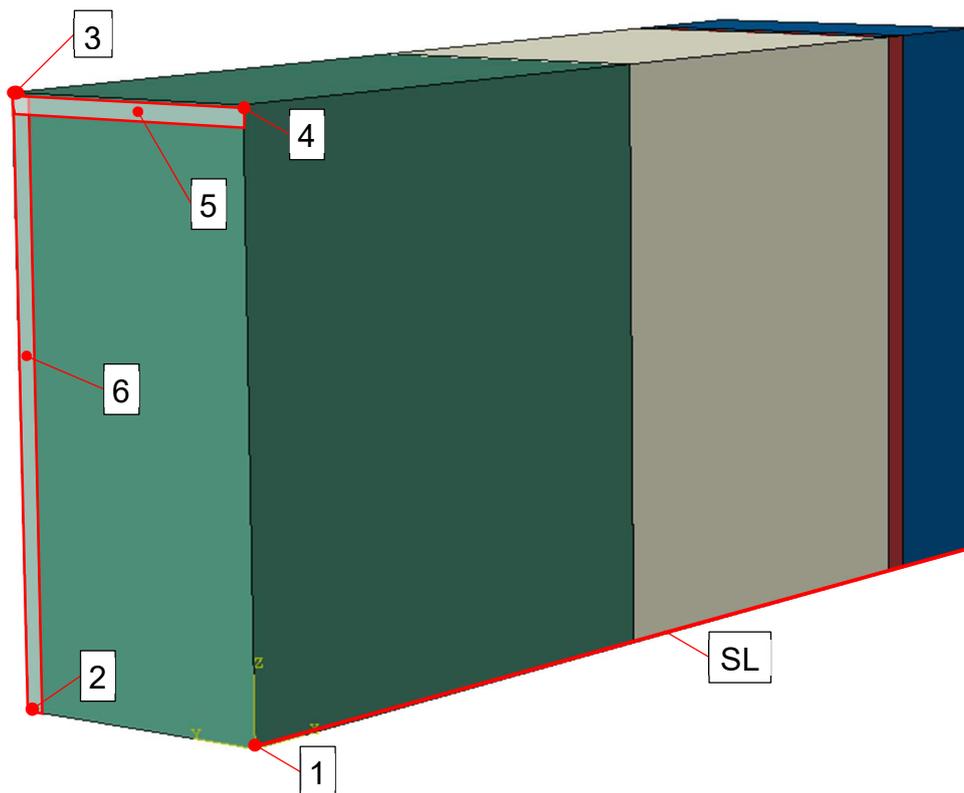


Abbildung 16: Benennung einiger relevanter Punkte im 3D-Einheitszellenmodell

Tabelle 9: Bezeichnung relevanter Bereiche und Punkte im 3D-Modell

SL	Symmetrielinie
1	Heißseite/Steinmitte (Knoten 3592)
2	Heißseite/vertikale Randmitte (Knoten 343)
3	Heißseite/Eckpunkt (Knoten 1)
4	Heißseite/horizontale Randmitte (Knoten 3250)
5	Heißseite/horizontaler Randbereich
6	Heißseite/vertikaler Randbereich

4.1 Thermische Analyse im 2D-Einheitszellenmodell

Die Stärke der Isolierung wirkt sich maßgeblich auf die Temperaturverteilung in der Zustellung aus. Das Ziel der Isolierung ist neben der Reduzierung des Wärmeverlustes auch eine Reduktion der Stahlmanteltemperatur. Eine zu hohe Stahlmanteltemperatur wirkt sich negativ auf die Festigkeit des Stahls und damit auf die Gesamtstabilität der Pfanne aus.

In Diagramm 2 wird die Temperatur der Heißseite (links, rot) und Kaltseite (rechts, blau) am Ende des Schrittes *Abkühlen 1,5h* in Abhängigkeit der Isolierungsstärke dargestellt. Je niedriger die Temperatur an der Heißseite zu diesem Zeitpunkt, desto höher fällt der Thermoschock durch die folgende zweite Charge aus. Eine hohe Temperatur an der Heißseite ist daher erstrebenswert. Je höher die Isolierungsstärke, desto höher ist die Heißseitentemperatur und desto geringer der Wärmeverlust. Die Temperatur an der Kaltseite, also die Stahlmanteltemperatur, fällt mit steigender Schichtdicke der Isolierung. Es ist erkennbar, dass beide Temperaturkurven mit zunehmender Isolierungsstärke an Steigung verlieren. Die Temperaturänderung pro Millimeter Isolationsstärke nimmt mit zunehmender Gesamtstärke immer weiter ab. Die Daten, auf denen das Diagramm 2 beruht, sind in Tabelle 10 nochmals aufgelistet.

Diagramm 2: Verlauf der Temperatur an der Heißseite bzw. an der Kaltseite am Ende des 3. Schrittes *Abkühlen 1,5h* in Abhängigkeit der Isolierungsstärke

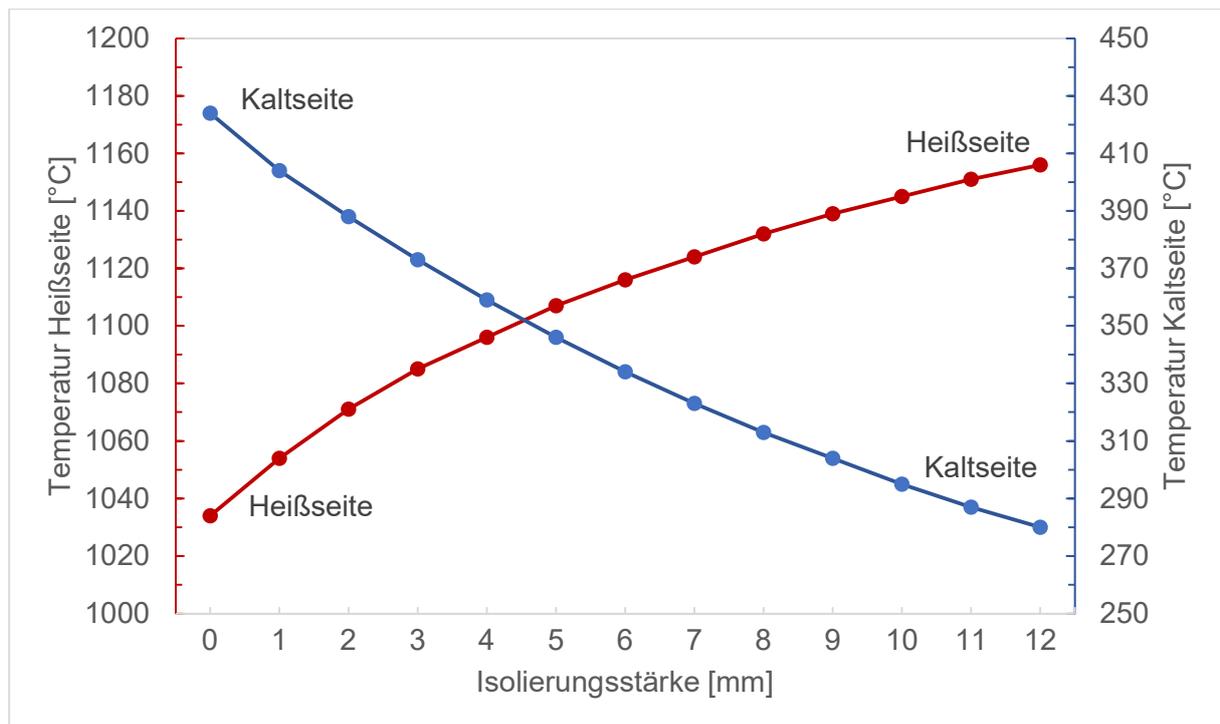


Diagramm 3 stellt die Temperaturverteilung über die gesamte Zustellung (261 mm) dar. Der Temperaturunterschied zwischen Heiß- und Kaltseite steigt mit zunehmender Isolierung. Eine höhere Isolierungsstärke führt also zu einem höheren Temperaturgradienten in der Zustellung. Die Abstände zwischen den Kurven konstanter Isolierungsstärke nehmen sowohl an der Heiß- als auch an der Kaltseite mit zunehmender Isolierungsstärke ab. Dieses Erkenntnis deckt sich mit den abflachenden Kurven in Diagramm 2. Die Abnahme der Stahlmantelaußentemperatur mit zunehmender Isolierung wird immer geringer. Eine weitere Erhöhung der Isolierungsstärke ist aufgrund des immer geringer werdenden Temperaturgewinns weniger zielführend. Die maximale Isolierungsstärke für die weiteren Untersuchungen wird daher auf 12 mm festgelegt.

Diagramm 3: Temperaturverlauf in der Zustellung bei variierender Isolierungsstärke (Iso 0–12 mm) am Ende des 3. Schrittes *Abkühlen 1,5h* ($x = 0$ mm = Heißseite, $x = 261$ mm = Kaltseite)

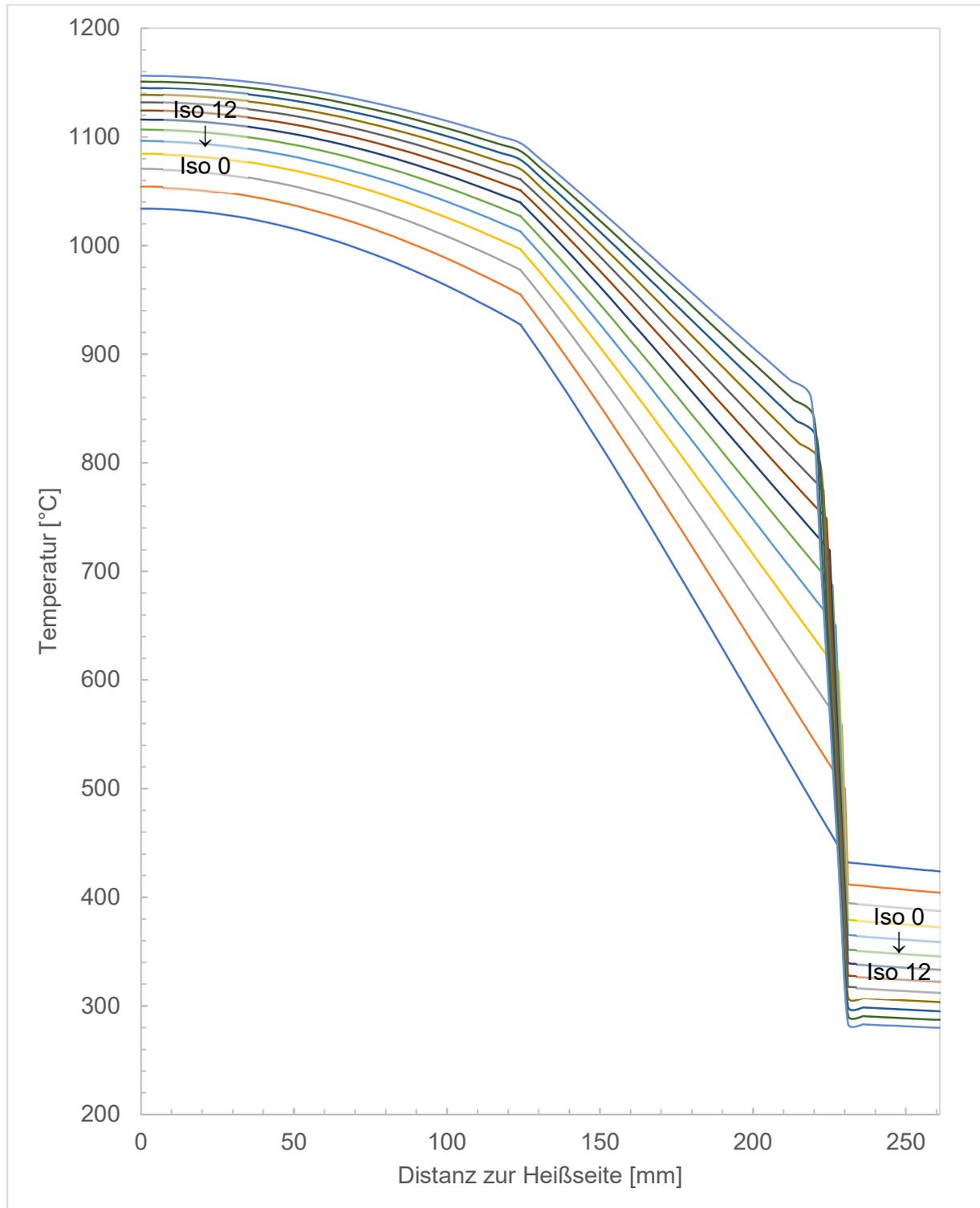


Tabelle 10: Ergebnisse der thermischen Analyse zum Ende des 3. Schrittes *Abkühlen 1,5h*
 VF = Verschleißfutter, SM = Stahlmantel, HS = Heißseite, KS = Kaltseite

Modellname	Isolierung [mm]	T _{HS/VF,Ende}	T _{KS/SM,Ende}
2D_2P10_Iso0	0	1034°C	424°C
2D_2P10_Iso1	1	1054°C	404°C
2D_2P10_Iso2	2	1071°C	388°C
2D_2P10_Iso3	3	1085°C	373°C
2D_2P10_Iso4	4	1096°C	359°C
2D_2P10_Iso5	5	1107°C	346°C
2D_2P10_Iso6	6	1116°C	334°C
2D_2P10_Iso7	7	1124°C	323°C
2D_2P10_Iso8	8	1132°C	313°C
2D_2P10_Iso9	9	1139°C	304°C
2D_2P10_Iso10	10	1145°C	295°C
2D_2P10_Iso11	11	1151°C	287°C
2D_2P10_Iso12	12	1156°C	280°C

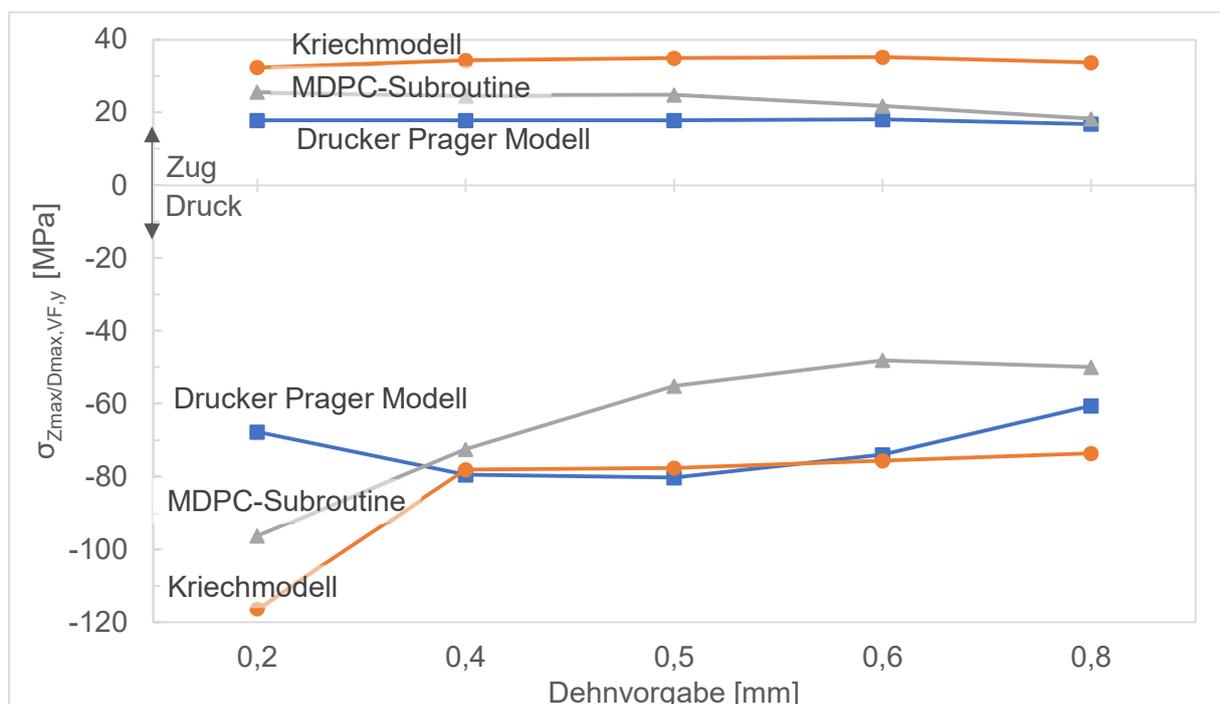
4.2 Einfluss der Variation der Dehnvorgabe

Zunächst werden die maximalen Zug- und Druckspannungen im Verschleißfutter betrachtet. Dazu sind die Trends der Maximalspannungen in Umfangsrichtung y (Diagramm 4) dargestellt.

Die maximalen Zugspannungen variieren kaum mit einer sich verändernden Dehnvorgabe. Allerdings unterscheidet sich die Höhe der Spannungen in Abhängigkeit des angewandten Materialmodelles erheblich. Das Kriechmodell liefert die höchsten maximalen Zugspannungen, während man mit dem Drucker-Prager-Modell (DP-Modell) die niedrigsten erhält. Die Maximalzugspannungen im Kriechmodell treten in allen betrachteten Fällen an der Heißeite im Steinmittelpunkt auf. Die Maximalspannungen für die Subroutine und das DP-Modell hingegen tendieren in Richtung des horizontalen Randbereichs des Steines. Die Spannungsspitzen für das DP-Modell sind dabei direkt an der Heißeite und für die MDPC-Subroutine heißseitennahe (Abstand zur Heißeite ist 26,88 mm) zu finden.

Im Negativbereich des Diagramm 4 sind die maximalen Druckspannungen abgebildet. Hier gibt es wesentliche Unterschiede zwischen den angewandten Materialmodellen. Während für die MDPC-Subroutine die Absolutwerte mit steigender Dehnvorgabe fallen, steigen diese im Falle des DP-Modells zunächst. Ab einer Dehnvorgabe von 0,5 mm sinkt die maximal auftretende Druckbeanspruchung allerdings wieder ab. Die maximale Druckspannung im Kriechmodell sinkt mit dem Anstieg der Dehnvorgabe von -116,3 MPa (DV 0,2 mm) auf -78,11 MPa (DV 0,4 mm) erheblich. Ein weiterer Anstieg der Dehnvorgabe reduziert die Druckspannungsspitzen nur mehr leicht (-73,6 MPa bei 0,8 mm Dehnvorgabe). Der Unterschied der Druckspannungsmaxima bei minimaler Dehnvorgabe (0,2 mm) zwischen Kriechmodell (-116,3 MPa) und DP-Modell (-67,72 MPa) fällt sehr hoch aus, bei 0,4–0,6 mm hingegen zeigen beide Modelle die nahezu gleichen Werte. Erst bei der maximalen Dehnvorgabe von 0,8 mm wird wieder ein größerer Unterschied der Werte für das DP-Modell (-60,54 MPa) und das Kriechmodell (-73,6 MPa) sichtbar. Die maximalen Druckspannungen treten für alle drei Materialmodelle an der Heißeite an der vertikalen Randmitte (Knotenpunkt 343) auf.

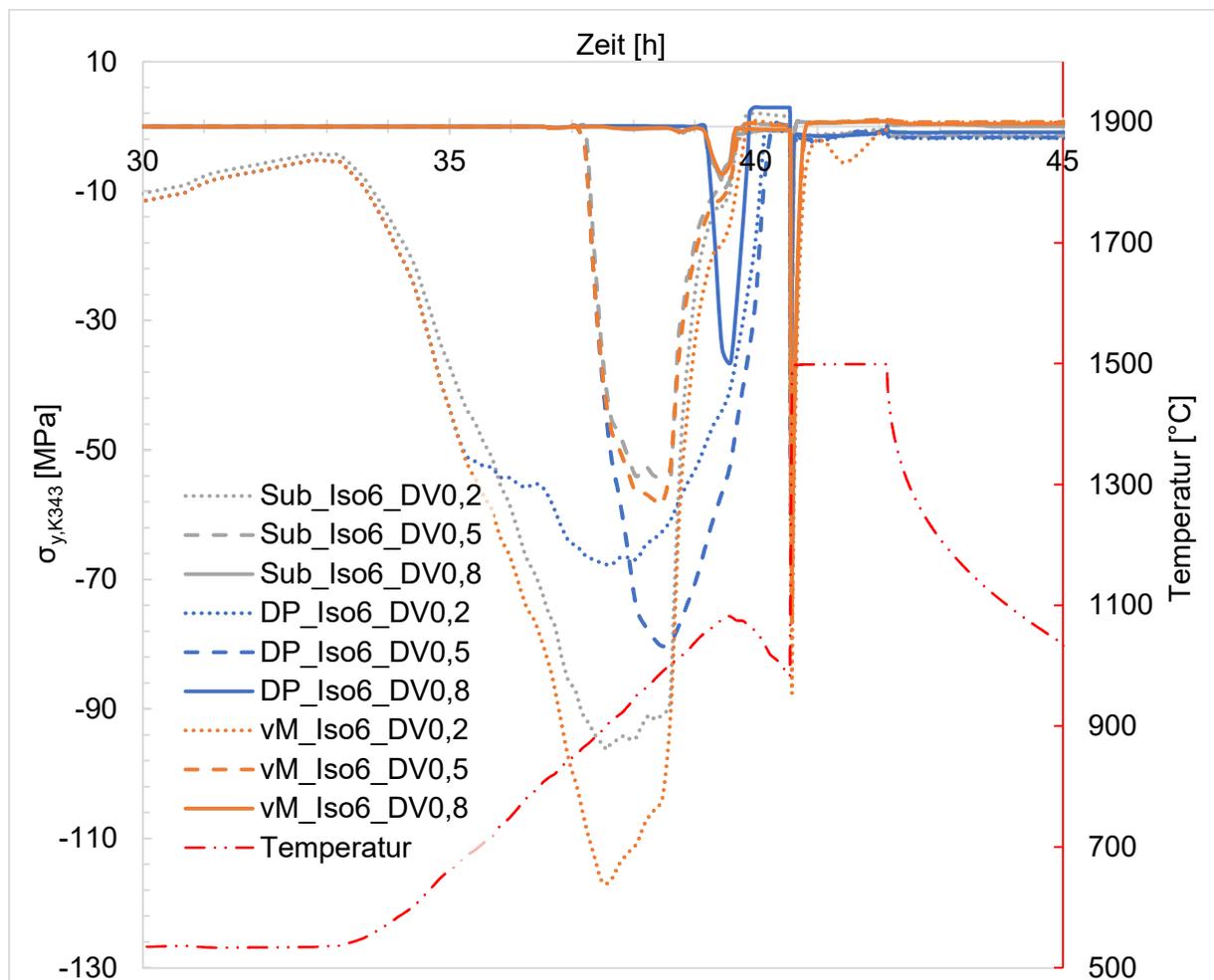
Diagramm 4: Vergleich der max. Zug- bzw. Druckspannungen im Verschleißfutter in Umfangsrichtung y in Abhängigkeit der Dehnvorgabe



Im Anhang (Tabelle 11) sind die Werte und Positionen der höchsten und niedrigsten auftretenden Maximalspannungen für die Umfangsrichtung y zusammengefasst.

In Diagramm 5 ist der Spannungsverlauf über die Prozesszeit für den Knotenpunkt 343 (vertikale Randmitte, Abbildung 17) dargestellt. Die maximalen Druckspannungen treten bei allen Materialmodellen während des Vorheizens auf. Mit zunehmender Dehnvorgabe von 0,2–0,8 mm wird das Spannungsmaximum aufgrund des späteren Schließens der Fugen zu einem immer späteren Zeitpunkt während des Vorheizens erreicht. Bis auf das DP-Modell nimmt die auftretende maximale Druckspannung für alle verwendeten Materialmodelle kontinuierlich mit steigender Dehnvorgabe ab. Beim DP-Modell nimmt die maximale Druckspannung bis 0,5 mm Dehnvorgabe zu. Die auftretenden maximalen Druckspannungen während des Thermoschocks sind kleiner als beim Vorheizen und werden ebenfalls mit größerer Dehnvorgabe kleiner.

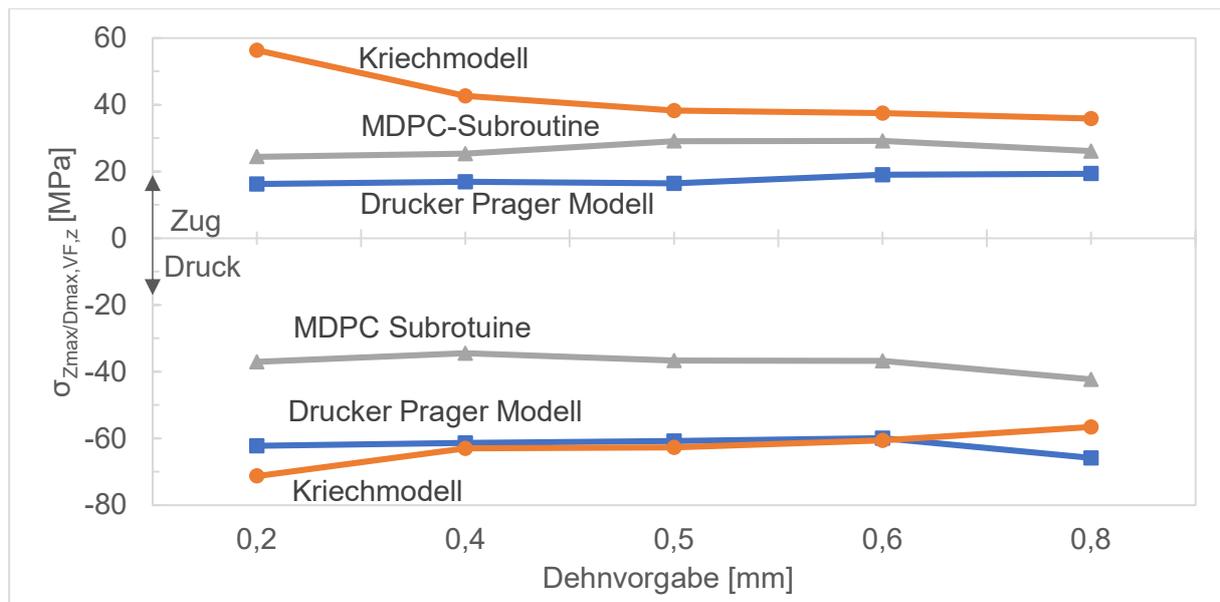
Diagramm 5: Spannungsverlauf in Umfangsrichtung y an der Heißseite in vertikaler Randmitte (Knotenpunkt 343) in Abhängigkeit der Dehnvorgabe



In Diagramm 6 sind die maximalen Zug- und Druckspannungen in vertikaler Richtung z dargestellt. Die Werte für die maximalen Druckspannungen in Vertikalrichtung sind grundsätzlich geringer als jene in Umfangsrichtung y. Das Druckspannungsmaximum der MDPC-Subroutine zeigt nur eine geringe Abhängigkeit von der Dehnvorgabe. Es fällt dabei von -37,04 MPa (0,2 mm Dehnvorgabe) auf -34,45 MPa (0,4 mm) ab und steigt dann mit weiter steigender Dehnvorgabe wieder auf -42,3 MPa (0,8 mm) an. Das Druckspannungsmaximum bei geringer Dehnvorgabe ist am vertikalen Rand des Steines zu finden, mit steigender Dehnvorgabe verschiebt sich das Druckspannungsmaximum in Richtung Steinmitte. Von 0,2–0,6 mm zeigt das DP-Modell nahezu konstante Werte der maximalen Druckspannung (-62,28 MPa – -59,92 MPa), erst bei einer Dehnvorgabe von 0,8 mm ist ein leichter Anstieg zu verzeichnen (-65,85 MPa). Bei der größten Dehnvorgabe von 0,8 mm tritt die maximale Druckspannung in Steinmitte auf, bei geringeren Dehnvorgaben am vertikalen Rand. Das Kriechmodell zeigt bei einer Dehnvorgabe von 0,2 mm die höchste maximale Druckspannung. Diese nimmt dann mit steigender Dehnvorgabe leicht ab, sodass bei einer Dehnvorgabe von 0,8 mm das DP-Modell das höchste Druckspannungsmaximum zeigt. Die Druckspannungsspitzen treten beim Kriechmodell ausnahmslos an der vertikalen Randmitte (Knotenpunkt 343) auf.

Auch die Maximalwerte für Zugspannungen in z-Richtung treten gehäuft in diesem Bereich auf (vertikale Randmitte, Knotenpunkt 343). Die höchsten Werte der maximalen Zugspannung werden mit zugrunde liegendem Kriechmodell erreicht. Die Werte nehmen mit steigender Dehnvorgabe von 0,2 mm (56,34 MPa) auf 0,8 mm (35,87 MPa) ab. Auch der Ort des Auftretens dieser Spannungen verschiebt sich von der Kaltseite bei geringer Dehnvorgabe in Richtung Heißseite bei höheren Dehnvorgaben. Die Werte für das DP-Modell sowie der MDPC-Subroutine zeigen kaum eine Abhängigkeit von der Dehnvorgabe. Das DP-Modell liefert die geringsten Maximalwerte und zeigt dabei eine leicht steigende Tendenz mit einer steigenden Dehnvorgabe von 0,2 mm (16,25 MPa) auf 0,8 mm (19,39 MPa). Die MDPC-Subroutine erreicht die höchsten Maximalwerte bei einer Dehnvorgabe von 0,5 mm (29,15 MPa). Bei höherer bzw. geringerer Dehnvorgabe fällt dieser Wert auf 26,05 MPa (0,8 mm) bzw. 24,43 MPa (0,2 mm) ab. Ebenso wie die Druckspannungsspitzen neigen auch die Zugspannungsspitzen zu einem Auftreten im vertikalen Randbereich des Steines.

Diagramm 6: Vergleich der max. Zug- bzw. Druckspannungen im Verschleißfutter in Vertikalrichtung z in Abhängigkeit der Dehnvorgabe

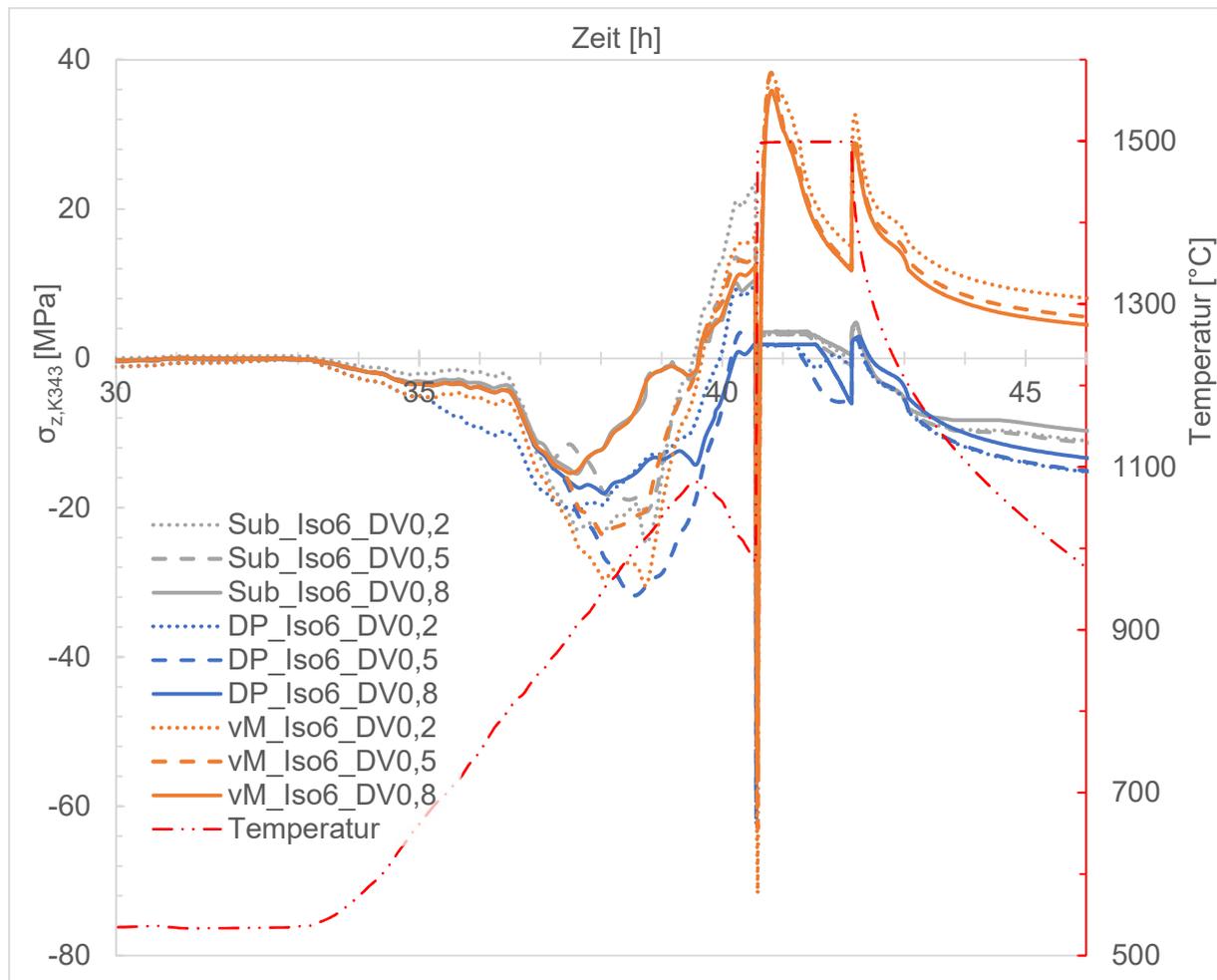


Eine Auflistung der Maximalwerte für Druck und Zug in Vertikalrichtung ist dem Anhang zu entnehmen (Tabelle 11).

In folgendem Diagramm 7 werden die Spannungsverläufe in Vertikalrichtung der drei Materialmodelle in vertikaler Randmitte, also im Knotenpunkt 343, in Abhängigkeit der Dehnvorgabe dargestellt. Betrachtet man jedes Materialmodell einzeln, unterscheiden sich die Spannungsverläufe mit zunehmender Dehnvorgabe nur im Bereich des Vorheizens deutlich. Die Druckspannungen während des Vorheizens erreichen bei der MDPC-Subroutine und dem Kriechmodell ein Maximum. Bei geringerer Dehnvorgabe steigen die Druckspannungen an diesem Zeitpunkt allerdings noch weiter an und erreichen so ein höheres Maximum, das später auftritt. Nach Erreichen des Druckmaximums fallen die Spannungen wieder ab und gehen ab dem Zeitpunkt, ab dem die Temperatur während des Vorheizens ihr Maximum erreicht hat, in Zugspannungen über. Diese Zugspannungen am Ende des Vorheizens fallen umso höher aus, je geringer die Dehnvorgabe ist. Im Falle der MDPC-Subroutine werden zum Ende des Vorheizens die höchsten Zugspannungen des gesamten Zeitverlaufs verzeichnet. Für das DP-Modell erhält man das Druckspannungsmaximum während des Vorheizens bei einer Dehnvorgabe von 0,5 mm. Die Maxima bei 0,2 mm sowie 0,8 mm Dehnvorgabe fallen geringer aus und treten früher auf. Auch beim DP-Modell gehen die Druckspannungen in Zug über. Die dabei auftretenden Zugspannungen sind jedoch weitaus geringer als bei den beiden anderen Modellen. Bei einer Dehnvorgabe von 0,8 mm treten nahezu keine Zugspannungen auf. Auch beim DP-Modell, mit Ausnahme der Variante mit 0,8 mm Dehnvorgabe, treten die Zugspannungsmaxima des gesamten Zeitprogrammes am Ende des Vorheizens auf.

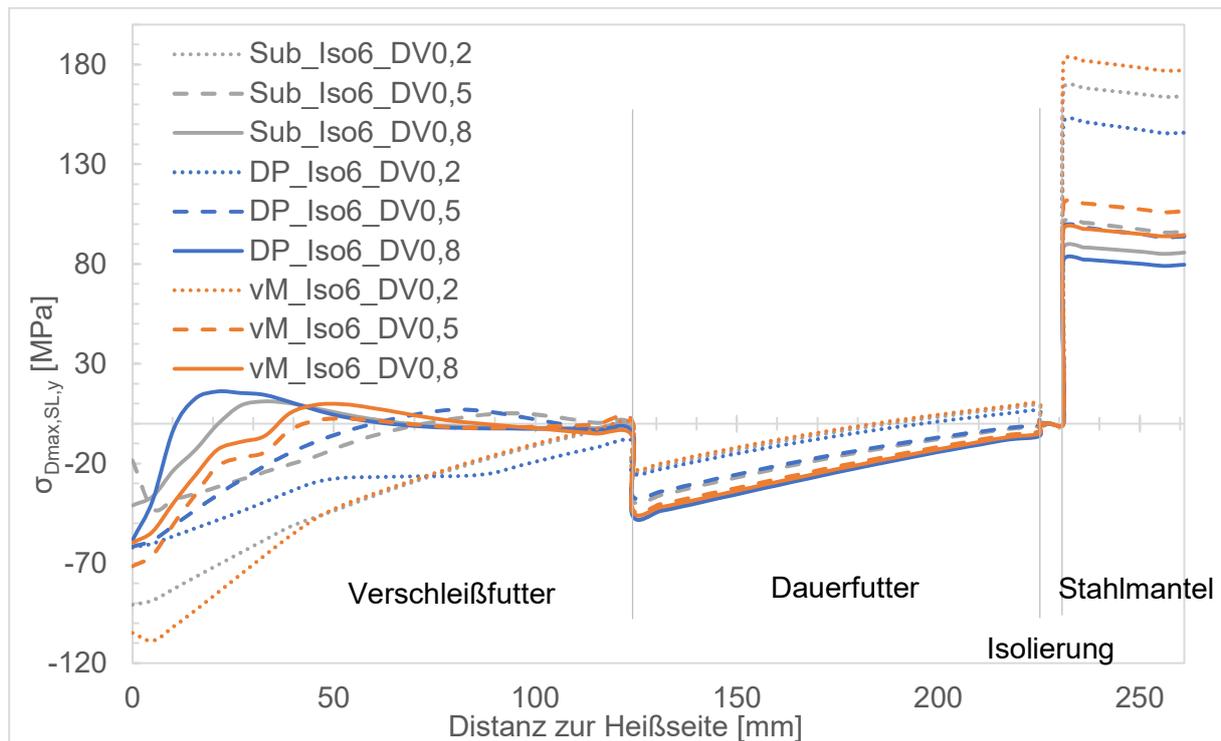
Der auf das Vorheizen folgende Thermoschock verursacht für alle drei Materialmodelle die höchsten Druckspannungen im gesamten Zeitverlauf. Dieses Druckspannungsmaximum fällt dabei mit zunehmender Dehnvorgabe geringer aus. Auf diese plötzlich auftretenden Druckspannungen folgt für alle drei Materialmodelle ein ebenso rascher Wechsel in den Zugspannungsbereich. Für das Kriechmodell wird hier das Zugspannungsmaximum des gesamten simulierten Prozesses erreicht und ist bei der geringsten Dehnvorgabe am höchsten. Die Höhe der Zugspannungen für das DP-Modell und MDPC-Subroutine hingegen fällt nur gering aus. Diese Zugspannungen bauen sich im Laufe der Charge wieder ab, im DP-Modell und der MDPC-Subroutine wechselt der Spannungszustand gegen Ende der Charge wieder in den Druckbereich. Die Spannungen im Kriechmodell reduzieren sich ebenfalls, bleiben aber im Zugspannungsbereich. Beim Entleeren der Pfanne am Ende der Charge ist ein erneuter Spannungsanstieg ersichtlich. Für das DP-Modell und die MDPC-Subroutine erfolgt ein Übergang zu Zugspannungen, welche etwa jenen zu Beginn der Charge entsprechen. Für das DP-Modell mit 0,8 mm Dehnvorgabe wird hier das Zugspannungsmaximum erreicht. Auch im Kriechmodell erfolgt ein erneuter Anstieg; die Höhe der Zugspannungen zu Beginn der Charge wird allerdings nicht mehr erreicht. Nach dem Entleeren, während dem eineinhalbstündigem Abkühlen (Schritt *Abkühlen 1,5h*), erfolgt für das DP-Modell und MDPC-Subroutine ein erneuter Wechsel zu Druckspannungen, die geringer ausfallen als die Druckspannungen während des Vorheizens. Die Spannungen im Kriechmodell verbleiben in diesem Abschnitt im Zugspannungsbereich und sinken mit fortschreitender Zeit. Die höchsten Absolutwerte für Druck (DP-Modell, MDPC-Subroutine) als auch Zug (Kriechmodell) werden während des adiabatischen Abkühlens dabei von jenen Varianten mit den geringsten Dehnvorgaben erreicht.

Diagramm 7: Spannungsverlauf in Vertikalrichtung an der Heißseite in vertikaler Randmitte (Knotenpunkt 343)



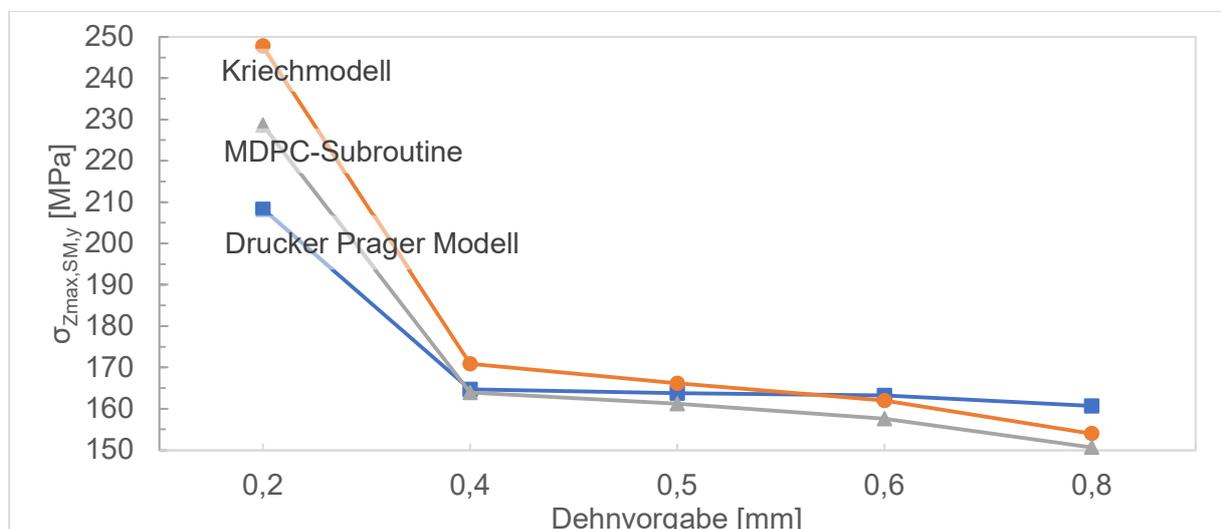
In Diagramm 8 sind die Spannungsverläufe in Umfangsrichtung y über die Zustellungsstärke entlang der Symmetrielinie zum Zeitpunkt der maximalen Druckspannung in Umfangsrichtung dargestellt. Wie zu erwarten ist, erfährt das Verschleißfutter die höchsten Druckbeanspruchungen und im Stahlmantel treten die höchsten Zugspannungen auf. Für alle Materialmodelle und Varianten, mit zwei Ausnahmen, tritt das Druckspannungsmaximum dabei direkt an der Heißseite auf. Nur in der MDPC-Subroutine mit der Dehnvorgabe 0,5 mm sowie im Kriechmodell mit der Dehnvorgabe 0,2 mm tritt das Maximum kurz hinter der Heißseite auf. Für das DP-Modell ist die Druckspannung an der Heißseite unabhängig von der Dehnvorgabe und für alle drei dargestellten Fälle (Dehnvorgabe 0,2 mm, 0,5 mm, 0,8 mm) nahezu ident. In einem gewissen Abstand zur Heißseite wechselt das Vorzeichen der herrschenden Spannungen aller Materialmodelle und es tritt Zug auf. Dieser Abstand zur Heißseite steigt mit abnehmender Dehnvorgabe und der Übergang zu Zug verschiebt sich weiter in Richtung Kaltseite. Für eine Dehnvorgabe von 0,8 mm reduzieren sich die Spannungen in Richtung Kaltseite ebenfalls, der Übergang zu Zugspannungen bleibt jedoch ganz aus und das gesamte Verschleißfutter steht unter Druck. Am Übergang zum Dauerfutter tritt wieder ein Spannungsabfall auf, die Druckspannungen erreichen jedoch nicht das Niveau jener im Verschleißfutter. Es wird eine generelle Abnahme der Spannungen von der Heiß- zur Kaltseite beobachtet. Bei einer Dehnvorgabe von 0,5–0,8 mm steht das gesamte Dauerfutter unter Druck, bei 0,2 mm Dehnvorgabe erfolgt nach etwa zwei Drittel der Schichtdicke ein Wechsel zu Zugspannungen. Im gesamten Stahlmantel herrscht nahezu konstanter Zug. Die Zugspannungen steigen dabei mit abnehmender Dehnvorgabe und sind im Kriechmodell am höchsten, im DP-Modell am geringsten.

Diagramm 8: Spannungsverlauf σ_y entlang der Symmetrielinie zum Zeitpunkt des jeweiligen Druckspannungsmaximum



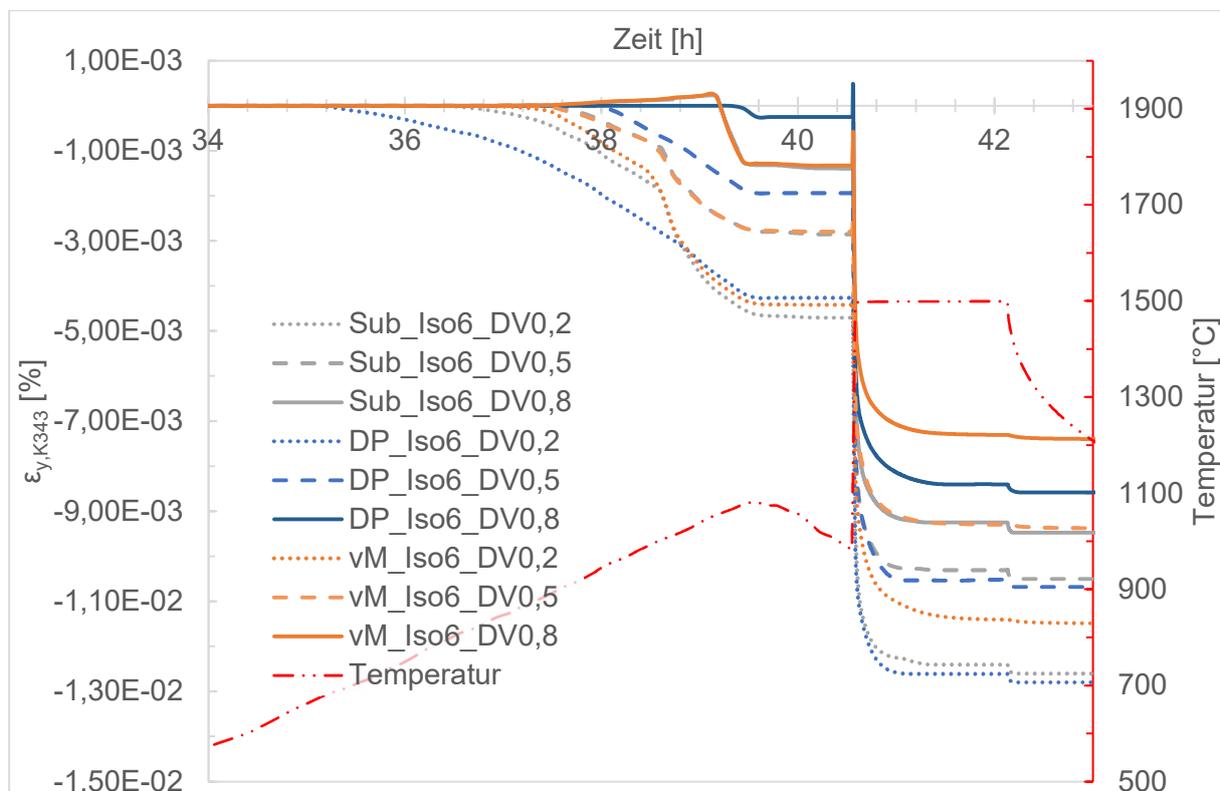
Wie bereits in Diagramm 8 ersichtlich, treten die größten Zugspannungen im Stahlmantel auf. Im Diagramm 9 sind die maximalen Zugspannungen im Stahlmantel in Umfangsrichtung dargestellt. Der stärkste Zugspannungsabfall tritt bei allen drei Materialmodellen zwischen einer Dehnvorgabe von 0,2 mm und 0,4 mm auf. Die Maximalwerte für die MDPC-Subroutine und das Kriechmodell zeigen auch bei weiter steigender Dehnvorgabe einen leicht fallenden Trend, während die Werte für das DP-Modell nahezu konstant bleiben. Die Zugbelastung im Stahlmantel wird durch eine steigende Dehnvorgabe also reduziert. Dieser Effekt fällt bei höheren Dehnvorgaben (0,5–0,8 mm) allerdings weniger drastisch aus als bei der Steigerung der Dehnvorgabe von 0,2 auf 0,4 mm. Die Maximalwerte der auftretenden Zugspannungen im Stahlmantel können dem Anhang (Tabelle 11) entnommen werden.

Diagramm 9: Vergleich der maximalen Zugspannungen im Stahlmantel in Umfangsrichtung σ_y in Abhängigkeit der Dehnvorgabe



Die irreversiblen Verformungen spielen bei der thermomechanischen Betrachtung eine wichtige Rolle. Dazu werden die Dehnungen der DP-Modelle (plastische Dehnung), Kriechmodelle (Kriechdehnung) und MDPC-Subroutine (kombinierte Kriech- und plastische Dehnung) in halber Höhe des Steines (Diagramm 10, Knotenpunkt 343) analysiert. Da es bei geringerer Dehnvorgabe früher zu einer geschlossenen Fuge kommt, treten die ersten Dehnungen bei steigender Dehnvorgabe zu einem späteren Zeitpunkt auf. Da Kriechen ein temperaturabhängiges Phänomen ist, setzen die Dehnungen im Kriechmodell erst bei höheren Temperaturen und damit zu einem späteren Zeitpunkt ein. Die Dehnungen nehmen bis zum Erreichen der Maximaltemperatur während des Vorheizens zu und bleiben dann bei leicht fallender Temperatur konstant bis zum Ende des Vorheizens. Während des Vorheizens fällt die Kriechdehnung höher aus als die plastische Verformung. Beim Thermoschock kommt es zu einem plötzlichen Anstieg der irreversiblen Verformungen bei allen Materialmodellen. Den höchsten Anstieg verzeichnet dabei das DP-Modell. Daraus kann man auf eine Dominanz der plastischen Verformungen in diesem Abschnitt schließen. Zu Beginn der Charge nehmen die Verformungen noch weiter zu und bleiben konstant bis zum Ende der Charge. Das Ausleeren der Pfanne und das folgende Abkühlen führen zu einem weiteren Anstieg, der im Vergleich zu den vorherigen Verformungen jedoch vernachlässigbar klein ist. Bei einer hohen Dehnvorgabe (0,8 mm) zeigt die MDPC-Subroutine die höchsten Verformungen, also eine Kombination der Kriech- und plastischen Dehnung. Bei einer Dehnvorgabe von nur 0,2 mm zeigt das DP-Modell die höchsten irreversiblen Verformungen. Je geringer die Dehnvorgabe, desto höher sind die irreversiblen Verformungen am Ende des Zyklus. Die dominierende Dehnung während des Thermoschocks ist die plastische Dehnung, während das Kriechen beim Vorheizen überwiegt.

Diagramm 10: Irreversible Verformungen in Umfangsrichtung y in halber Höhe des Steinrandes an der Heißseite (Knotenpunkt 343)

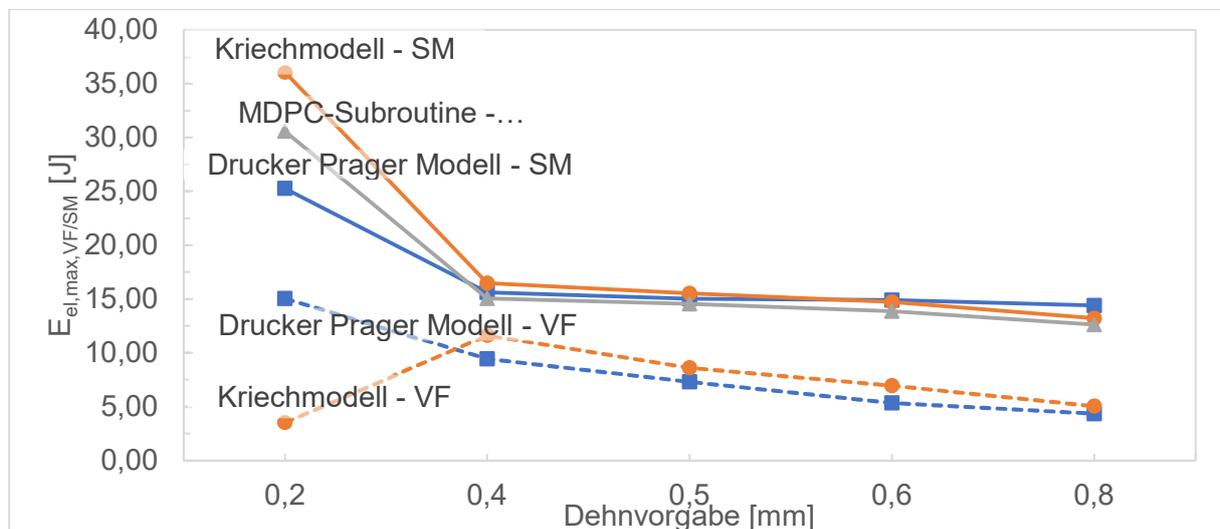


In Diagramm 11 ist ersichtlich, dass sich die Maximalwerte der elastischen Energie im Stahlmantel bei einer variierenden Dehnvorgabe so wie die Maximalwerte der Zugspannung im Stahlmantel (Diagramm 9) verhalten. Der größte Abfall der maximalen elastischen Energie im Stahlmantel wird bei der Erhöhung der Dehnvorgabe von 0,2 mm auf 0,4 mm erreicht. Eine weitere Erhöhung auf 0,8 mm reduziert die Maximalenergie aller Materialmodelle nur mehr gering. Den Wert der höchsten maximalen elastischen Energie bei einer Dehnvorgabe von 0,2 mm erreicht das Kriechmodell, den geringsten Wert erhält das DP-Modell. Bei der höchsten Dehnvorgabe (0,8 mm) zeigt hingegen das DP-Modell den höchsten Wert. Dieser unterscheidet sich allerdings nur gering von denen für das Kriechmodell und die MDPC-Subroutine.

Auch bei Betrachtung der Spannungen im Verschleißfutter in Umfangs- und Vertikalrichtung (Diagramm 4, Diagramm 6) stimmt der Kurvenverlauf mit jenen in Diagramm 11 für das Verschleißfutter überein. Der Verlauf der maximalen elastischen Energie im Verschleißfutter nach dem DP-Modell nimmt mit zunehmender Dehnvorgabe konstant ab. Beim Kriechmodell erfolgt zunächst ein Anstieg der elastischen Maximalenergie (Dehnvorgabe 0,2–0,4 mm), ehe der Wert bei einer weiteren Steigerung der Dehnvorgabe (0,4–0,8 mm) kontinuierlich abfällt. Der Unterschied der maximalen elastischen Energie im Verschleißfutter zwischen dem DP-Modell und dem Kriechmodell ist von 0,4 mm bis 0,8 mm Dehnvorgabe gering.

Wie in Kapitel 3.7 bereits erwähnt, kann über die elastische Energie im Verschleißfutter bzw. Stahlmantel auf die Gesamtbelastung in der jeweiligen Schicht geschlossen werden. Die Gesamtbelastung sowohl im Verschleißfutter als auch im Stahlmantel nimmt mit steigender Dehnvorgabe ab.

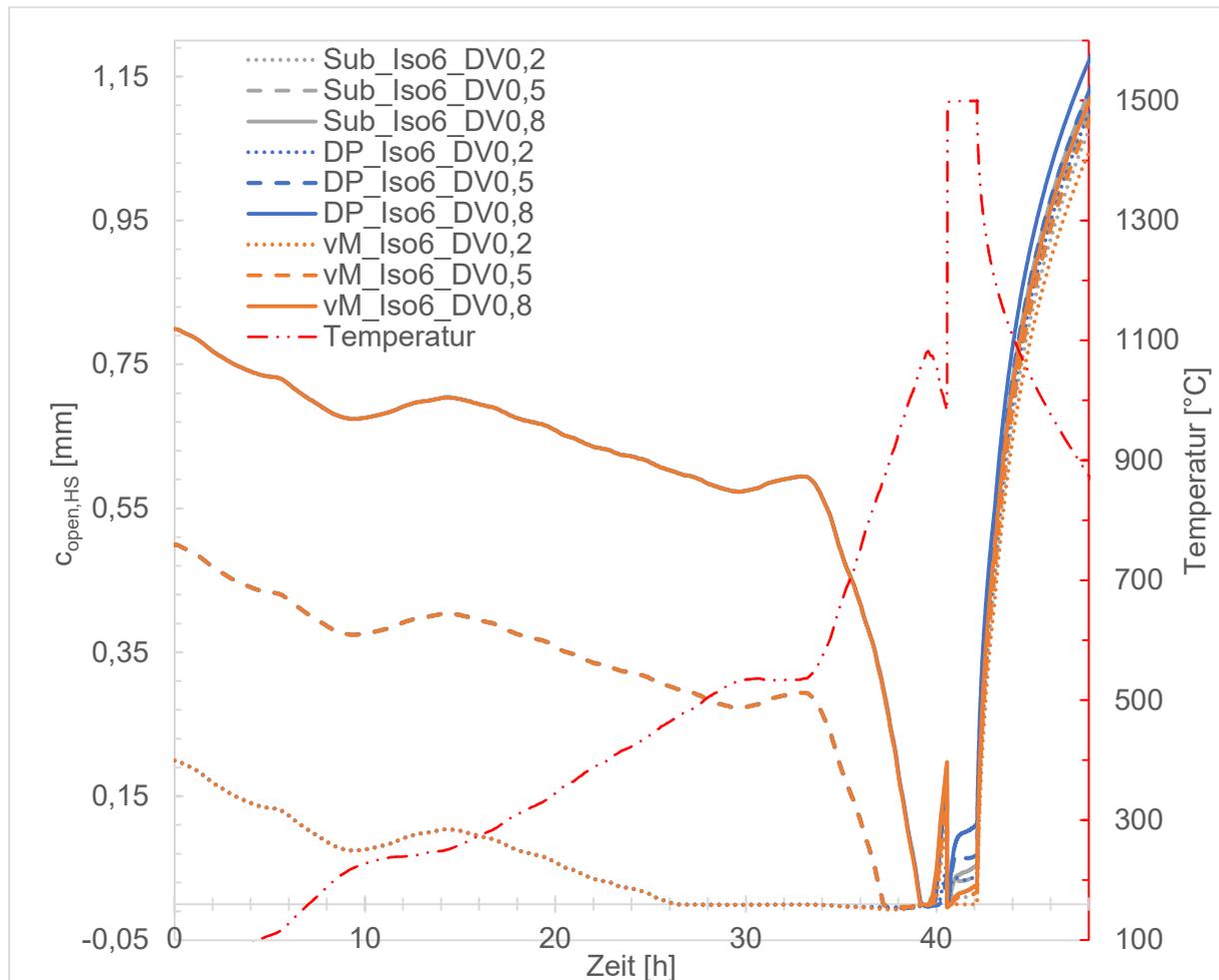
Diagramm 11: Vergleich der maximalen elastischen Energien im Verschleißfutter (VF) bzw. Stahlmantel (SM) in Abhängigkeit der Dehnvorgabe.



Von Interesse ist auch die Fugenöffnung an der Heißseite. Diese wirkt sich nicht nur negativ auf die Stabilität aus. Durch offene Fugen kann auch Flüssigstahl in das Verschleißfutter eindringen und dieses beschädigen. In Diagramm 12 ist der Verlauf der vertikalen Fugenöffnung entlang der halben Steinhöhe dargestellt. Zu Beginn des Vorheizens ist die Höhe der Fugenöffnung gleich der Dehnvorgabe. Mit fortschreitender Zeit kommt es zum Schließen der Fuge. Je geringer die Dehnvorgabe, desto früher schließt sich die Vertikalfuge. Unterschiede in den verwendeten Materialmodellen treten bis zum Ende des Aufheizens nicht auf. Beim Erreichen der maximalen Vorheiztemperatur und dem folgenden Temperaturabfall öffnet sich die vertikale Fuge an der Heißseite wieder. Je höher die Dehnvorgabe ist, desto größer fällt diese Öffnung aus. Zum Zeitpunkt des Thermoschocks schließt sich diese Fuge wieder vollständig. Im Verlauf der Charge kommt es zu einer erneuten Öffnung. Die

Fugenöffnung in diesem Abschnitt ist nicht nur von der Dehnvorgabe, sondern auch vom Materialmodell abhängig. Während die Fugenöffnung am Ende der Charge bei einer Dehnvorgabe von 0,8 mm für das DP-Modell etwa 0,1 mm erreicht, beträgt diese für die MDPC-Subroutine 0,05 mm und beim Kriechmodell lediglich 0,03 mm. Nach dem Entleeren der Pfanne und beim adiabatischen Abkühlen kommt es wieder zur Fugenöffnung. Der Einfluss der ursprünglichen Dehnvorgabe sowie des Materialmodells auf diese neuerliche Fugenöffnung ist gering, kann jedoch noch erkannt werden. Auch hier gilt, dass eine größere Dehnvorgabe zu größerer Fugenöffnung führt. Die höchsten Fugenöffnungen erhält man nach dem DP-Modell, die geringsten mit dem Kriechmodell.

Diagramm 12: Verlauf der Fugenöffnung am Rand der Heißseite (Knotenpunkt 343)



Der Einfluss der verschiedenen Materialmodelle auf die maximale Fugenöffnung am Ende des Schrittes *Abkühlen 1,5h* an der Heißseite ist nochmals in Diagramm 13 dargestellt. Dieser Zeitpunkt ist von Interesse, da hier in der Praxis die nächste Charge folgt. Sowie bereits in Diagramm 12 kann man auch hier erkennen, dass das DP-Modell die höchsten und das Kriechmodell die geringsten Werte liefert. Bei Betrachtung der irreversiblen Verformungen in Diagramm 10 ist die gleiche Reihung ersichtlich. Ein Zusammenhang zwischen der Fugenöffnung und den irreversiblen Verformungen liegt nahe und wird auch in früheren Arbeiten [7, 12, 14] (siehe Kapitel 2.3) bereits bestätigt. Für alle drei Materialmodelle gilt: Je höher die Dehnvorgabe, desto höher ist die Fugenöffnung. Diese beträgt am Ende der Stehzeit ($t = 43,63$ h), also vor der nächsten Charge, für das Kriechmodell zwischen 0,58 mm (DV 0,2 mm) und 0,65 mm (DV 0,8 mm). Beim DP-Modell erhält man für die Fugenöffnung zu diesem Zeitpunkt Werte, die von 0,63 mm (DV 0,2 mm) bis 0,70 mm (DV 0,8 mm) reichen. Die MDPC-Subroutine liegt mit 0,60 mm (DV 0,2 mm) bis 0,66 mm (DV 0,8 mm) dazwischen.

Diagramm 13: Fugenöffnung am Ende des Schrittes *Abkühlen 1,5h* an der Heißseite des Verschleißfutters in Abhängigkeit der Dehnvorgabe.

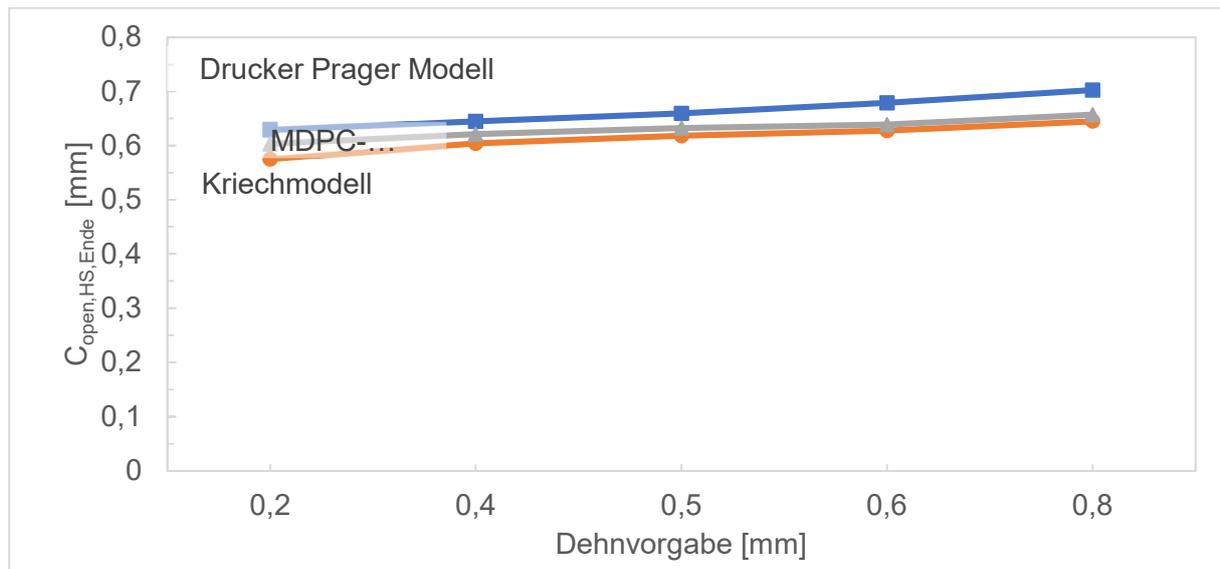
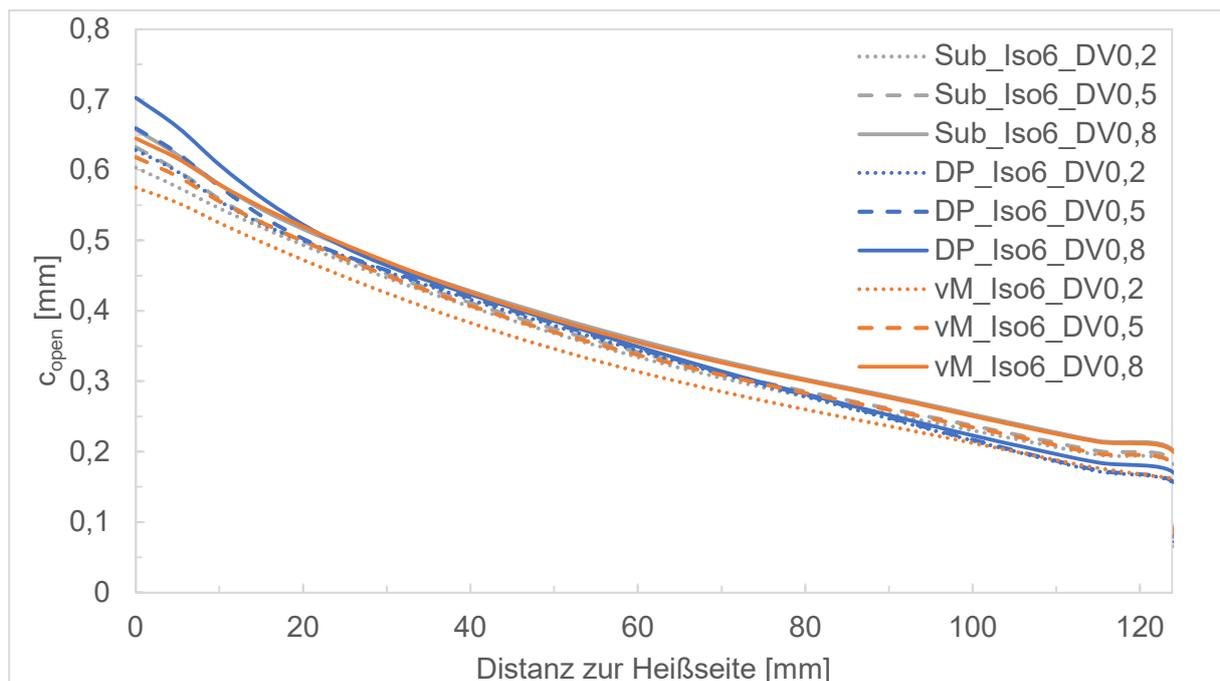


Diagramm 14 zeigt den Verlauf der Öffnung der Vertikalfuge entlang der halben Steinhöhe des Verschleißfutters. Diese ist an der Heißseite am größten und an der Kaltseite am geringsten. Die Fugenöffnung an der Heißseite zeigt eine größere Abhängigkeit von der Dehnvorgabe als jene an der Kaltseite. In beiden Fällen gilt jedoch: je höher die Dehnvorgabe, desto höher die Fugenöffnung. Während das DP-Modell die höchsten Werte der Fugenöffnung an der Heißseite verzeichnet, zeigt an der Kaltseite das Kriechmodell und die MDPC-Subroutine die höchsten Werte. Die Verläufe des Kriechmodells und der MDPC-Subroutine sind für eine Dehnvorgabe von 0,5 mm bzw. 0,8 mm nahezu ident, nur bei der geringsten Dehnvorgabe von 0,2 mm gibt es einen größeren Unterschied. Hier zeigt das Kriechmodell eine geringere Fugenöffnung als die MDPC-Subroutine.

Diagramm 14: Öffnung der Vertikalfuge entlang halber Steinhöhe am Ende des 3. Schrittes *Abkühlen 1,5h*

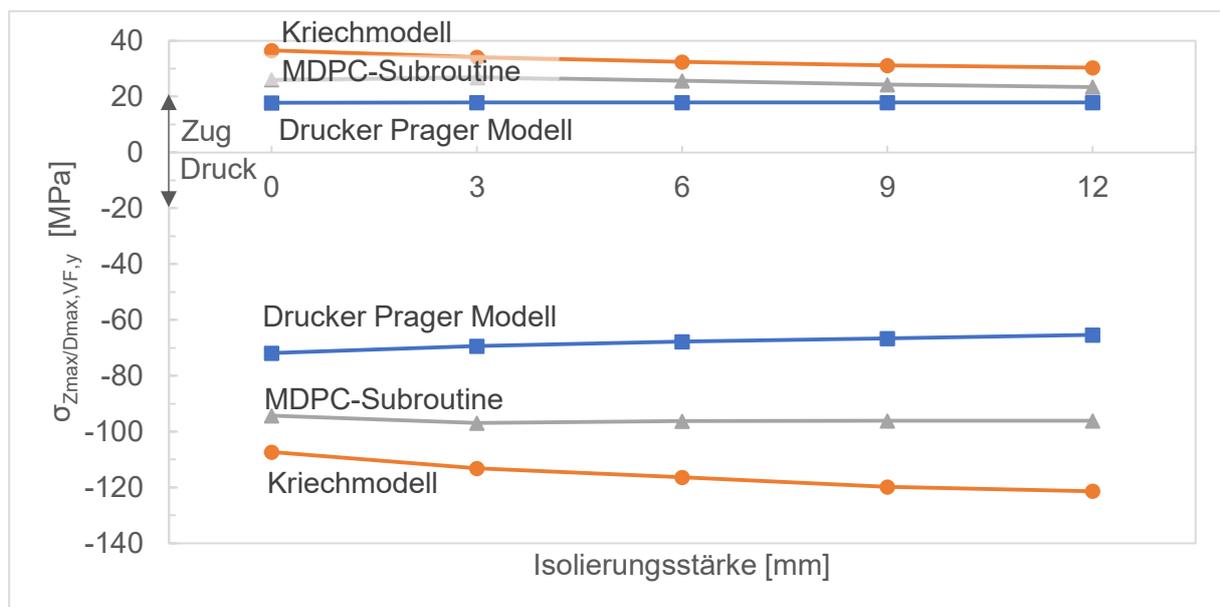


4.3 Einfluss der Variation der Isolierungsstärke

Wieder wird zunächst der Trend der maximalen Zug- und Druckspannungen im Verschleißfutter in Umfangsrichtung Y (Diagramm 15) betrachtet. Die maximalen Zugspannungen in Umfangsrichtung zeigen berechnet nach dem DP-Modell keine Abhängigkeit der Isolierungsstärke. Auch bei der MDPC-Subroutine sowie beim Kriechmodell gibt es nur einen geringen Abfall der Spannungsspitzen mit zunehmender Isolierungsstärke. Die höchsten Zugspannungsspitzen erhält man mit dem Kriechmodell, das DP-Modell weist die geringsten Werte auf. Die Maximalspannungen im Kriechmodell sowie nach der MDPC-Subroutine treten allesamt an der Heißseite in Steinmitte auf. Nach dem DP-Modell hingegen treten diese am horizontalen Rand der Heißseite des Steines auf.

Die maximalen Druckspannungen ndern sich ebenso nur minimal mit variierender Isolierungsstärke, die MDPC-Subroutine liefert dabei nahezu konstante Werte. Das DP-Modell zeigt die niedrigsten Maximalwerte fur Druck, welche mit steigender Isolierung leicht abfallen (-71,87 MPa bei DV 0,2 mm zu -65,36 MPa bei DV 0,8 mm). Die Kriechmodell-Spannungen zeigen den hochsten Maximaldruck der drei betrachteten Materialmodelle. Mit steigender Isolierung von 0 mm (-107,3 MPa) auf 12 mm (-121,3 MPa) nehmen diese noch weiter zu. Samtliche Druckspannungsspitzen aller drei Materialmodelle konzentrieren sich dabei auf die Mitte des vertikalen Steinrandes der Heißseite (Knotenpunkt 343).

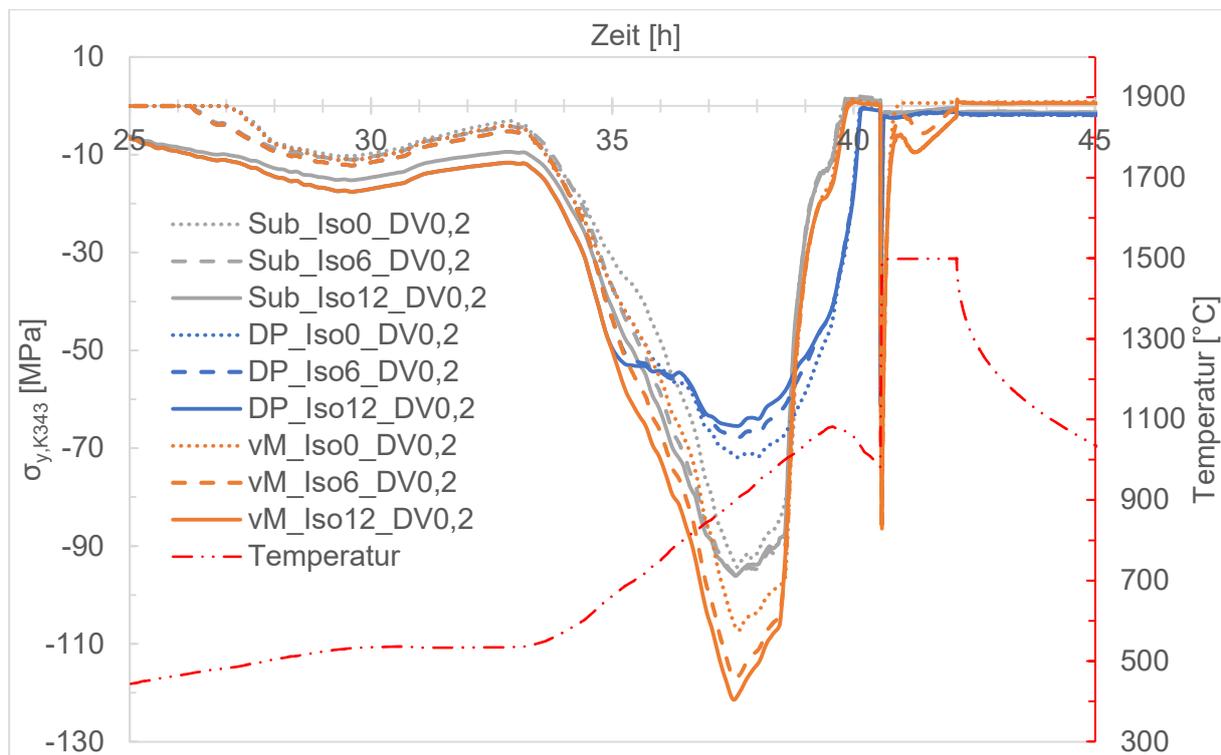
Diagramm 15: Vergleich der max. Zug- bzw. Druckspannungen im Verschleißfutter in Umfangsrichtung y in Abhangigkeit der Isolierungsstärke



In Diagramm 16 ist der zeitliche Verlauf der Spannungen in Umfangsrichtung y im Knotenpunkt 343 dargestellt. Eine Abhangigkeit der Spannungsverlaufe von der Isolierungsstärke ist vor allem wahrend des Aufheizvorgangs erkennbar. Ab etwa 33,5 Stunden erfolgt ein schnellerer Temperaturanstieg als davor. Ab diesem Zeitpunkt nehmen auch die auftretenden Druckspannungen stark zu. Die hochsten Werte werden mit dem Kriechmodell und der hochsten Isolierungsstärke (12 mm) erreicht. Mit abnehmender Isolierung sinkt auch die Hohe der Spannungsspitzen. Die niedrigsten Druckspannungsspitzen erhalt man mit dem DP-Modell. Die Abhangigkeit der Hohe der Spannungsspitzen ist hier umgekehrt zum Kriechmodell: Mit steigender Isolierung sinkt die maximal auftretende Druckspannung mit dem DP-Modell. Bei der MDPC-Subroutine liegen die Spannungsspitzen zwischen jenen der beiden anderen Materialmodelle. Eine Abhangigkeit von der Isolierungsstärke ist dabei kaum wahrzunehmen. Zum Ende des Aufheizens sinken die Druckspannungen fur alle drei Modelle

wieder stark ab und erreichen dabei einen nahezu spannungsfreien Zustand. Der Thermoschock führt zu erneuten, plötzlich auftretenden Druckspannungsspitzen, welche allerdings nicht mehr die Höhe des Druckes während des Aufheizens erreichen. Diese Spitzen bauen sich sehr schnell wieder ab. Das DP-Modell und die MDPC-Subroutine zeigen bei allen Isolierungsstärken (0–12 mm) für die restliche Zeit sehr ähnliche Spannungen, welche bei allen Varianten der Isolierungsstärke vernachlässigbar klein sind. Die Spannungen beim Kriechmodell reduzieren sich ebenfalls stark, der Druck während der Charge bleibt allerdings aufrecht. Dieser fällt bei höherer Isolierung größer aus als bei geringer Isolierung. Im Verlauf der Charge bauen sich aber auch diese Spannungen ab und erreichen ein ähnliches Niveau im Vergleich mit den anderen beiden Materialmodellen.

Diagramm 16: Spannungsverlauf in Umfangsrichtung Y an der Heißseite in vertikaler Randmitte (Knotenpunkt 343) in Abhängigkeit der Isolierungsstärke



Der Trend der maximalen Zug- und Druckspannungen im Verschleißfutter in Vertikalrichtung ist in Diagramm 17 dargestellt. Wie bereits in Umfangsrichtung zeigen auch die Maximalspannungen in vertikaler Richtung nur eine geringe Abhängigkeit von der Isolierungsstärke. Bei den Zugspannungsspitzen im Kriechmodell lässt sich ein leicht steigender Trend mit zunehmender Isolierung erkennen. Die maximalen Spannungen beim Kriechmodell treten zudem an der Kaltseite in vertikaler Randmitte des Steins auf. Die Werte der maximalen Zugspannungen nach der MDPC-Subroutine sind weitgehend konstant. Die geringsten Maximalwerte für Zug erhält man mit dem DP-Modell, die Zugspannungsspitzen treten dabei allesamt nicht an der Heißseite auf. Mit zunehmender Isolierung verschiebt sich das Zugspannungsmaximum immer weiter in Richtung Kaltseite.

Auch die Druckspannungsmaxima variieren kaum mit einer sich verändernden Schichtdicke der Isolierung. Allerdings befinden sich alle Spannungsspitzen am Rand der Heißseite des Steins (Knotenpunkt 343), bis auf eine Ausnahme in Steinmitte (DP, Isolierung = 9 mm). Wiederum unterscheiden sich die Materialmodelle nur in der Höhe der Absolutwerte, wobei das Kriechmodell die höchsten Druckspannungen liefert. Die geringsten Ergebnisse erhält man hier in der MDPC-Subroutine.

Im Anhang (Tabelle 12) sind die Werte und Positionen der höchsten und niedrigsten auftretenden Maximalspannungen für die Umfangsrichtung y sowie für die Vertikalrichtung z zusammengefasst.

Diagramm 17: Vergleich der max. Zug- bzw. Druckspannungen im Verschleißfutter in Vertikalrichtung in Abhängigkeit der Isolierstärke

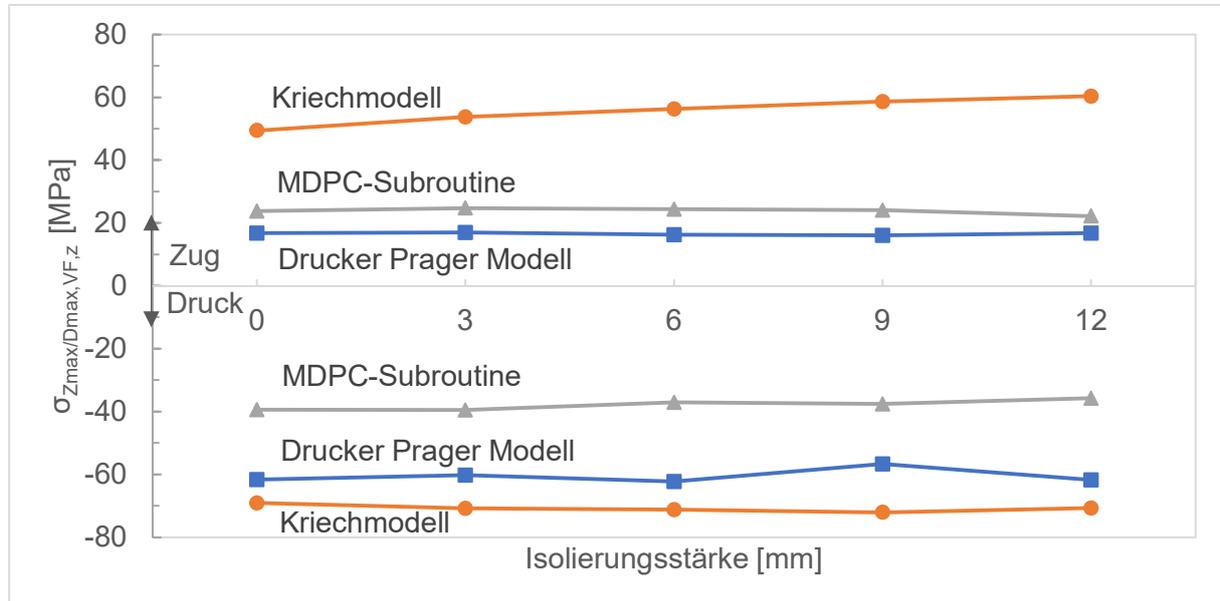


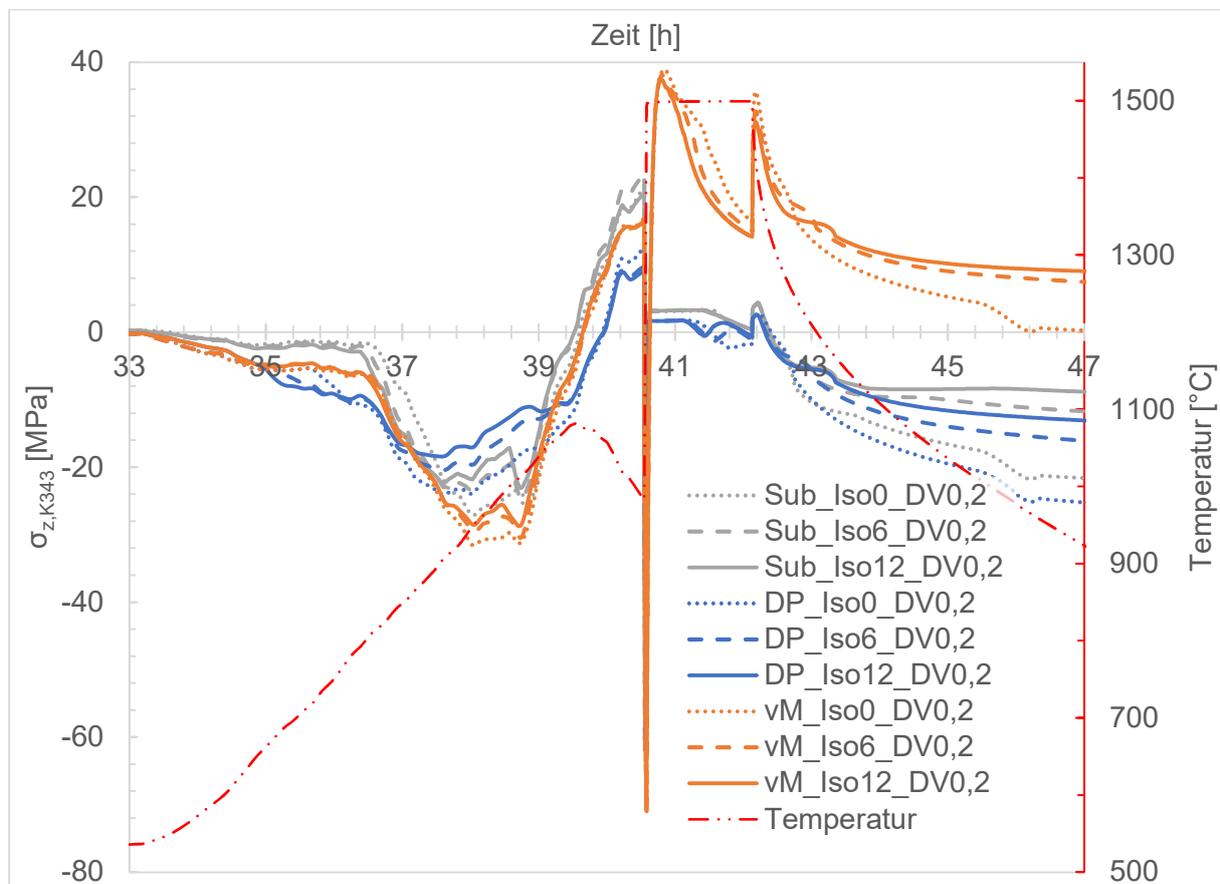
Diagramm 18 zeigt den zeitlichen Verspannungsverlauf in Vertikalrichtung im Knoten 343, also am Rand der Heißseite in halber Steinhöhe. Die Druckspannungsmaxima beim Vorheizen treten für alle Materialmodelle und Isolierungsvarianten im selben Zeitbereich auf. Die Höhe der Druckspitzen beim Vorheizen unterscheidet sich je nach Materialmodell und Isolierstärke. Je höher die Isolierung, desto höher der auftretende Druck. Das DP-Modell zeigt die geringsten Druckspannungen, im Kriechmodell fallen sie am höchsten aus. Sämtliche Spannungsverläufe gehen gegen Ende des Vorheizens in den Zugspannungsbereich über. Der Einfluss des verwendeten Materialmodelles auf die Höhe dieser Spitzen ist dabei größer als jener der Isolierung. Die höchsten Zugbelastungen erfahren die Modelle der MDPC-Subroutine, die geringsten die DP-Modelle. Die hier auftretenden Zugspannungsspitzen stellen für DP und die MDPC-Subroutine die höchsten Zugspannungswerte des gesamten Zeitverlaufs dar. Im Kriechmodell werden diese erst später erreicht.

Die höchsten Druckspannungen aller drei Materialmodelle werden beim Thermoschock erreicht. Die Höhe dieser maximalen Druckspannungen wird dabei kaum von der Isolierstärke beeinflusst. Für das Kriechmodell wechseln die Spannungen direkt nach dem Thermoschock wieder zu Zugspannungen und erreichen dort die Maximalzugspannungen. Die Höhe dieses Maximums ist nur gering von der Isolierstärke beeinflusst und bei 0 mm Isolierung nur leicht höher als bei 12 mm. Diese Zugspannungsspitzen bauen sich im Laufe der Charge ab. Je höher die Isolierstärke ist, desto schneller sinken die Zugspannungen. Beim Entleeren der Pfanne treten für das Kriechmodell nochmals Zugspannungsspitzen auf. Die Höhe der Maximalzugspannungen nach dem Thermoschock wird aber nicht mehr erreicht. Nach diesen erneuten Spannungsspitzen flachen die Zugspannungen des Kriechmodells beim Abkühlen der Pfanne bzw. während der Stehzeit ab. Die Spannungsverläufe im DP-Modell und in der MDPC-Subroutine zeigen ebenfalls einen schnellen Anstieg nach dem Thermoschock. Die dabei auftretenden Zugspannungen sind im Vergleich zu jenen am Ende des Vorheizens allerdings vernachlässigbar. Auch für diese beiden Modelle sinken die Spannungen im Laufe der Charge, bevor sie beim Entleeren wieder kurz ansteigen. Während des Abkühlens treten bei DP und der MDPC-Subroutine wieder Druckspannungen auf. Je geringer die Isolierung ist, desto

höher sind die auftretenden Drücke. Die Spannungen am Ende des adiabatischen Abkühlens für 1,5h erreichen nicht die Höhe der auftretenden Druckspannungen während des Vorheizens. Das weitere Abkühlen ($t > 43,63$ h) sorgt beim DP-Modell für einen weiteren Druckanstieg, der zu einer höheren Druckbelastung als beim Aufheizen führt. In der Praxis folgt auf das eineinhalbstündige Abkühlen (*Abkühlen 1,5h*) allerdings eine weitere Charge und dieser weitere Druckanstieg tritt nicht auf.

Eine größere Schichtdicke der Isolierung führt beim Abkühlen im Falle des Kriechmodells zu höheren Zugspannungen. Bei den im DP-Modell und der MDPC-Subroutine herrschenden Druckspannungen in diesem Abschnitt, wirkt sich eine höhere Isolierung positiv aus und die auftretenden Drücke sinken.

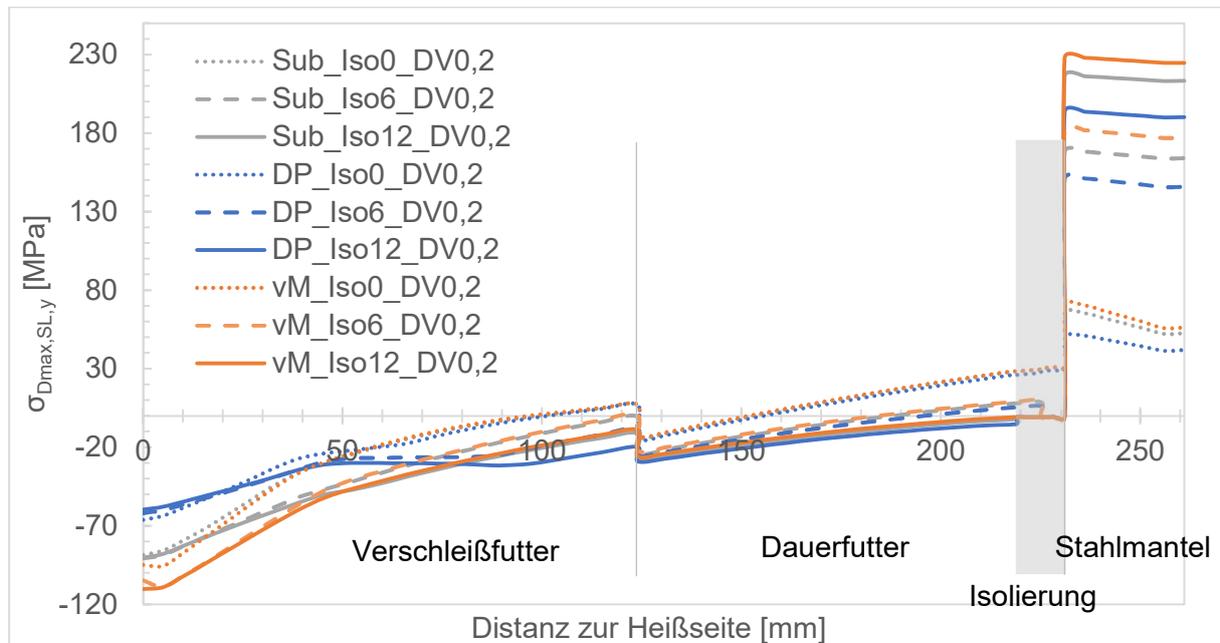
Diagramm 18: zeitlicher Spannungsverlauf in Vertikalrichtung z an der Heißseite in Steinmitte (Knotenpunkt 343)



Betrachtet man den Spannungsverlauf der Umfangsspannung entlang der Symmetrielinie in Steinmitte (Diagramm 19) für unterschiedliche Isolierungsstärken, wird vor allem der Einfluss der Isolierung auf die Zugspannungen im Stahlmantel sichtbar. Es gilt: Je höher die Schichtdicke der Isolierung ist, desto höher ist auch die auftretende Zugspannung im Stahlmantel in Umfangsrichtung. Das Kriechmodell liefert die höchsten, das DP-Modell die geringsten Zugspannungen. Das Verschleißfutter steht bei den Varianten mit 6–12 mm Isolierung unabhängig vom Materialmodell vollständig unter Druck. Nur beim Zustellaufbau ohne Isolierung, also Iso = 0 mm, kommt es kaltseitennahe zu geringen Zugspannungen im Verschleißfutter. Die Druckspannungsmaxima treten ohne Ausnahme innerhalb der ersten 5 mm des Verschleißfutters an der Heißseite auf. Die höchsten Drücke erhält man beim Kriechmodell, welche mit steigender Isolierung sinken. Die geringsten Werte weist das DP-Modell auf. Die maximalen Druckspannungen nach DP und MDPC-Subroutine zeigen nur eine geringe Abhängigkeit von der Isolierungsstärke. Für alle drei Materialmodelle gilt: Mit steigendem Abstand zur Heißseite sinken die auftretenden Druckspannungen im

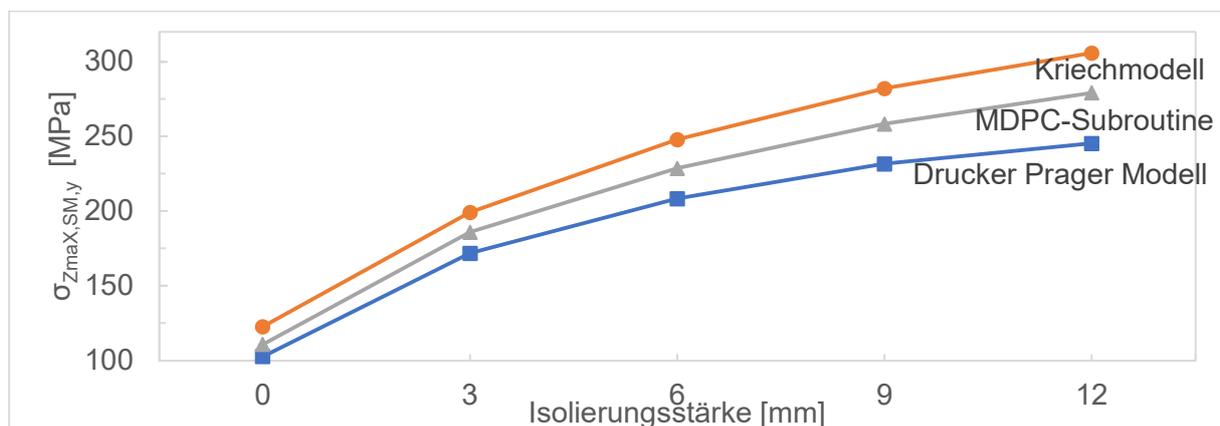
Verschleißfutter. Beim Übergang zum Dauerfutter gibt es einen erneuten Anstieg der Druckspannungen, die aber geringer ausfallen als im Verschleißfutter. Die höchste Druckbeanspruchung erfährt das Dauerfutter bei hoher Isolierung (12 mm), die höchste Zugbeanspruchung hingegen bei geringer bzw. keiner Isolierung (0 mm). Wie auch bereits bei der Variation der Dehnvorgabe (Diagramm 8) kann eine generelle Abnahme der Spannungen im Verschleiß- und Dauerfutter mit steigendem Abstand zur Heißseite erkannt werden.

Diagramm 19: Spannungsverlauf σ_y entlang der Symmetrielinie zum Zeitpunkt des jeweiligen Druckspannungsmaximums



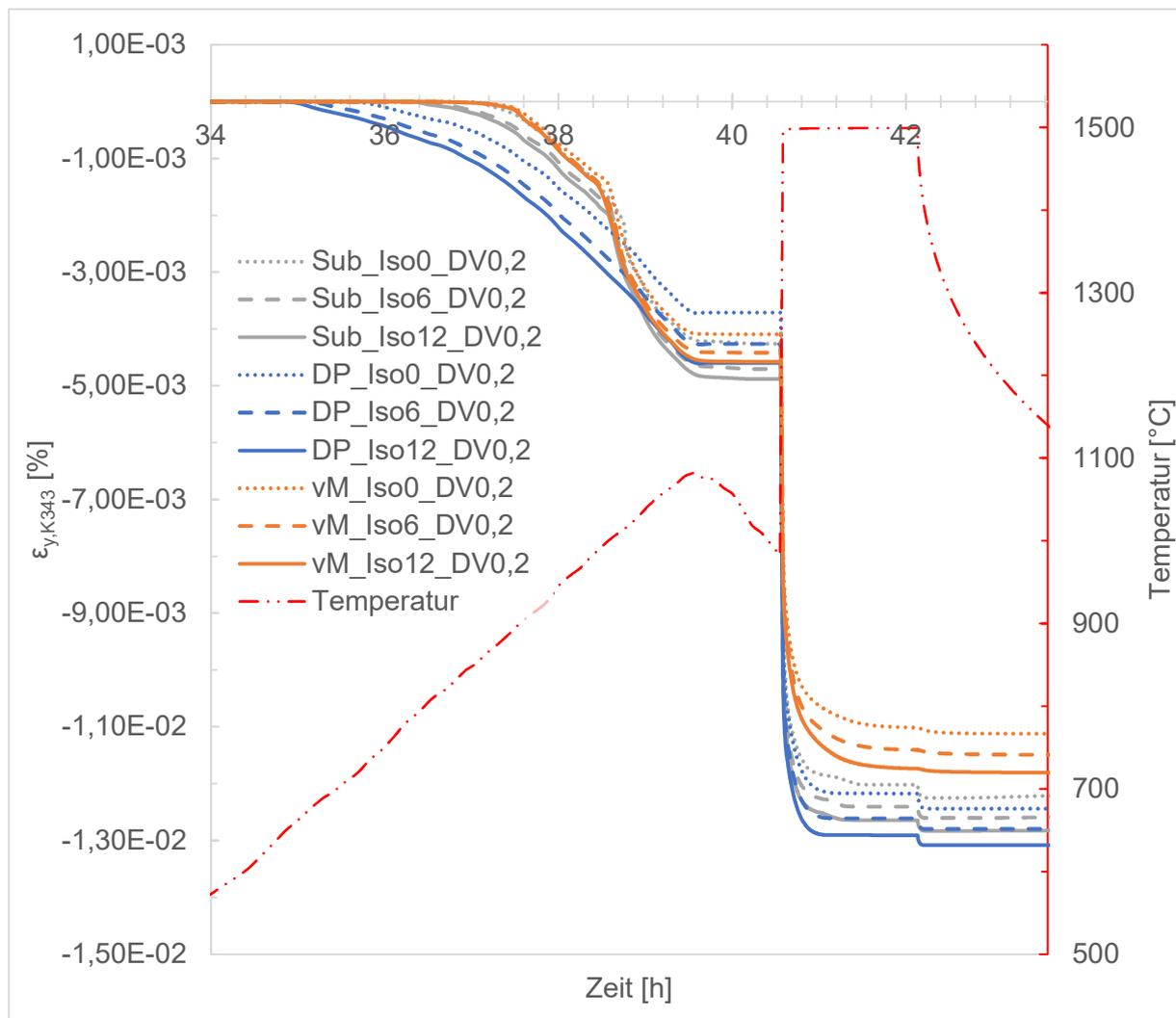
Der signifikante Einfluss der Isolierung auf die Zugspannungsmaxima in Umfangsrichtung y im Stahlmantel wird in Diagramm 20 verdeutlicht. Für alle drei Materialmodelle gilt: Die maximale Zugspannung steigt mit zunehmender Isolierungsstärke. Die Steigerung je Millimeter Isolierungsstärke nimmt allerdings mit steigender Gesamtdicke ab. Für alle Isolierungsvarianten von 0 mm–12 mm weist das Kriechmodell (122,7–305,8 MPa) die höchsten Stahlmantelzugspannungen auf, das DP-Modell (102,7–245,4 MPa) die geringsten. Die Werte der MDPC-Subroutine liegen dazwischen. Der Unterschied zwischen den Materialmodellen steigt mit zunehmender Isolierungsstärke. Die Maximalwerte der Stahlmantelspannungen in Umfangsrichtung in Abhängigkeit der Isolierungsstärke sind im Anhang (Tabelle 12) zusammengefasst.

Diagramm 20: Vergleich der maximalen Zugspannungen im Stahlmantel in Vertikalrichtung z in Abhängigkeit der Isolierungsstärke



Wieder werden die irreversiblen Verformungen in Umfangsrichtung im Knotenpunkt 343 (vertikale Randmitte an der Heißseite) betrachtet (Diagramm 21). Die plastischen Dehnungen nach DP treten dabei als Erstes auf, gefolgt von jenen nach der MDPC-Subroutine und den Kriechdehnungen, welche erst ab einer ausreichend hohen Temperatur auftreten. Die irreversiblen Verformungen steigen dabei bis zur Maximaltemperatur beim Vorheizen an, ehe sie konstant bis zum Thermoschock verlaufen. Bis kurz vor dieser Maximaltemperatur sind die höchsten Verformungen die plastischen Dehnungen, welche dann von den Kriechdehnungen überschritten werden. Jene Varianten mit der höchsten Isolierungsstärke weisen dabei die größten Verformungen auf. Beim Thermoschock erfolgt wieder ein plötzliches Auftreten großer Verformungen. Dieser Anstieg ist primär vom Materialmodell und weniger von der Isolierungsstärke beeinflusst. Den höchsten Anstieg beim Thermoschock verzeichnen die plastischen Dehnungen, der Anstieg der Kriechdehnungen fällt geringer aus. Während der Charge kommt es sowohl zu plastischen als auch zu Kriechdehnungen. Der größere Verformungszuwachs für das Kriechmodell deutet darauf hin, dass auch in diesem Abschnitt die Kriechdehnungen überwiegen. Beim Entleeren der Stahlpfanne ($t = 42,13$ h) kommt es zu einem erneuten leichten Anstieg, der vor allem bei den plastischen Dehnungen erkennbar ist. Am Ende des eineinhalbstündigen adiabatischen Abkühlens ($t = 43,63$ h) zeigt das DP-Modell die höchsten Verformungen, das Kriechmodell die geringsten. Wieder gilt: Je höher die Schichtdicke der Isolierung ist, desto höher sind die irreversiblen Verformungen.

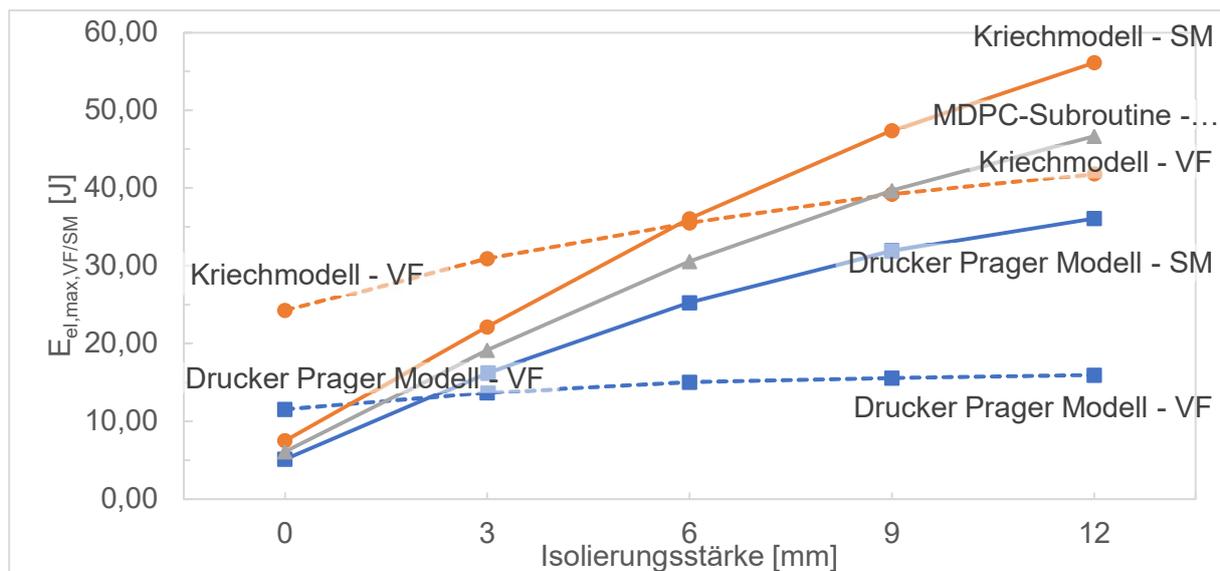
Diagramm 21: Irreversible Verformungen in Umfangsrichtung y in halber Höhe des Steinrandes an der Heißseite (Knotenpunkt 343)



So wie auch die Zugspannungen im Stahlmantel (Diagramm 20) mit steigender Isolierungsstärke zunehmen, ist das auch für die maximale elastische Energie der Fall. Den höchsten Anstieg erfährt dabei das Kriechmodell. Hier steigt die Energie von 7,52 Joule (0 mm Isolierung) auf 56,14 Joule (12 mm Isolierung) an. Die Stahlmantelenergie für das DP-Modell steigt von 5,14 (0 mm) auf 36,09 Joule (12 mm Isolierung) an. Die im Modell gespeicherte maximale elastische Energie nach MDPC-Subroutine liegt zwischen diesen beiden Verläufen. Bei allen drei Materialmodellen sinkt die Zunahme der Maximalwerte der elastischen Stahlmantelenergie je Millimeter Isolierungsstärke mit zunehmender Gesamtdicke der Isolierung.

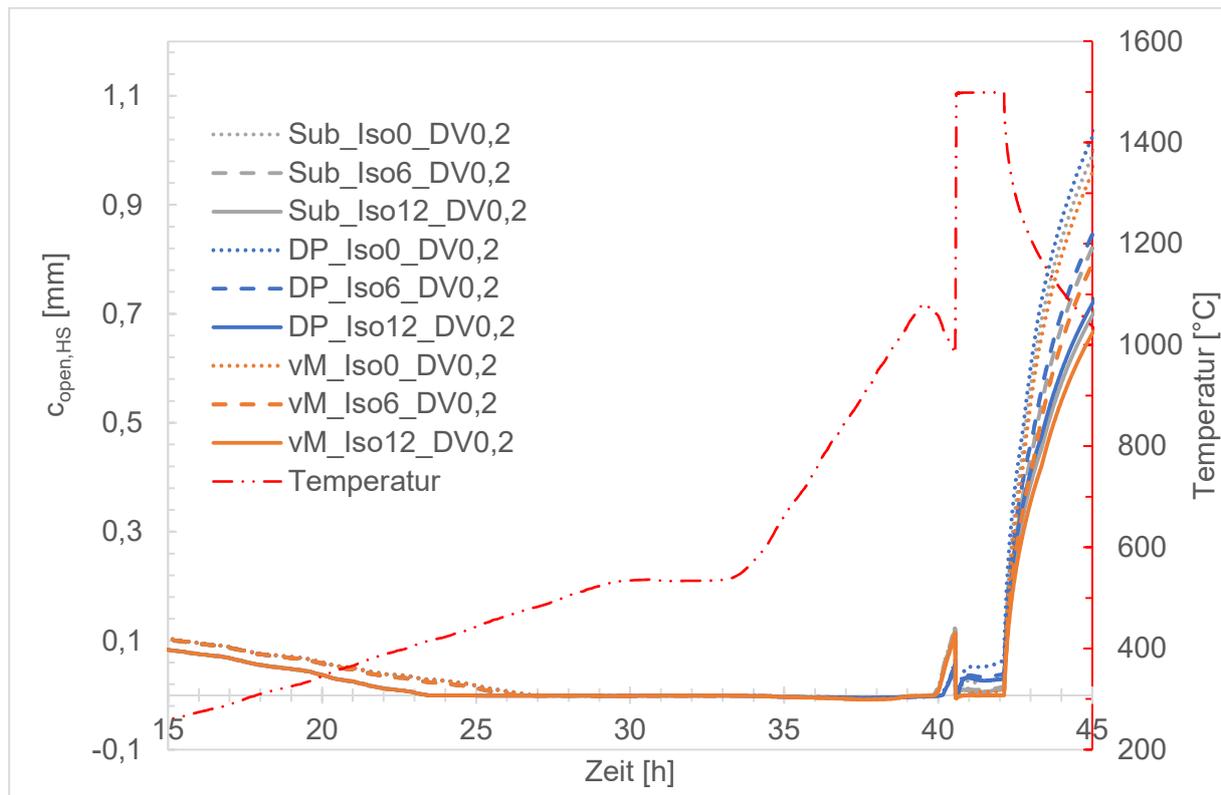
Auch im Verschleißfutter ist ein Anstieg der maximalen elastischen Energie mit zunehmender Isolierungsstärke erkennbar. Die Maximalwerte des Kriechmodells (24,29–41,84 Joule) erreichen höhere Werte und zeigen dabei eine höhere Abhängigkeit von der Isolierung (0–12 mm) als jene für das DP-Modell (11,56–15,97 Joule). Bei Betrachtung der Spannungen im Verschleißfutter in Umfangs- und Vertikalrichtung (Diagramm 15 und Diagramm 17) findet sich eine Erklärung dafür. Hier zeigen die Maximalspannungen des Kriechmodells sowohl für Druck als auch Zug in Umfangs- und Vertikalrichtung höhere Werte als das DP-Modell. Auch der Anstieg dieser Werte mit zunehmender Isolierungsstärke fällt für das Kriechmodell deutlicher aus als für Drucker-Prager. Generell gilt: Je höher die Isolierungsstärke, desto höher ist die Gesamtbelastung sowohl im Stahlmantel als auch im Verschleißfutter.

Diagramm 22: Vergleich der maximalen elastischen Energien im Verschleißfutter (VF) bzw. Stahlmantel (SM) in Abhängigkeit der Isolierungsstärke



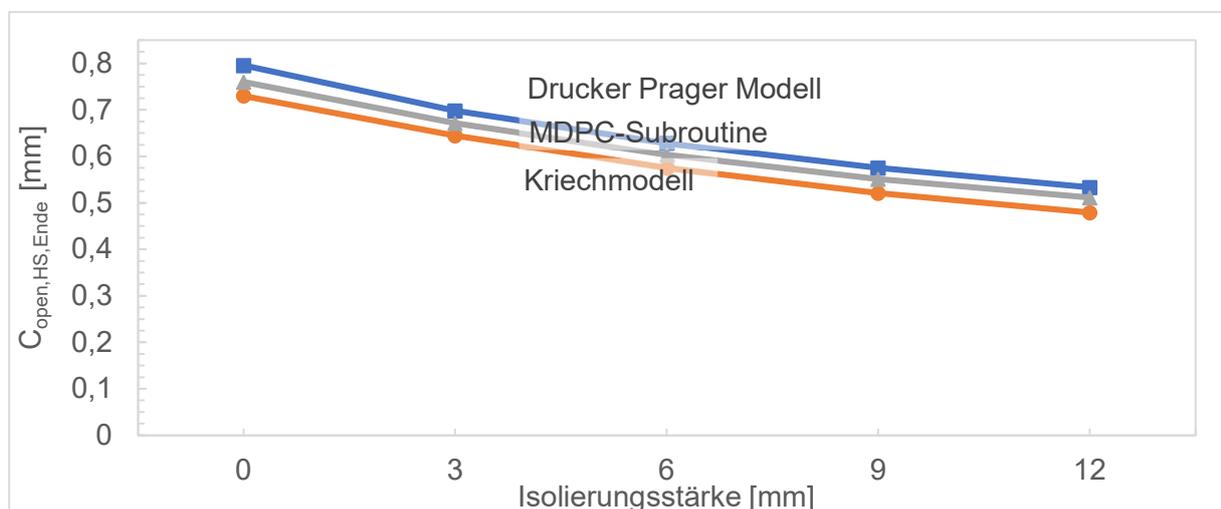
Der zeitliche Verlauf der Fugenöffnung am Rand der Heißseite in halber Steinhe ist in Diagramm 23 abgebildet. Die zu Beginn des Vorheizens ($t = 0$ h) für alle Varianten gleiche Fugenöffnung von 0,2 mm (entspricht der Dehnvorgabe) schließt sich im zeitlichen Verlauf umso früher, je höher die Isolierungsstärke ist. Nachdem die Vorheiztemperatur ein Maximum erreicht und wieder leicht abfällt, ffnen sich die Fugen unabhängig von der Isolierungsstärke gegen Ende des Vorheizens. Diese Fugenöffnung ist für die MDPC-Subroutine und das Kriechmodell ident und höher als für DP. Bei allen Varianten schließen sich diese Fugen beim Thermoschock wieder. Beim DP-Modell und MDPC-Subroutine kommt es im Verlauf der Charge wieder zu einer leichten Öffnung, welche mit steigender Isolierungsstärke zunimmt und für DP höher ausfllt als für die MDPC-Subroutine. Beim Entleeren der Stahlpfanne kommt es noch einmal zu einem starken Anstieg der Fugenöffnung, bei dem ein klarer Einfluss der Isolierungsstärke erkannt werden kann. Am höchsten ist diese Öffnung für das DP-Modell, am geringsten für das Kriechmodell. Je höher die Isolierungsstärke ist, desto geringer ist die Fugenöffnung beim adiabatischen Abkühlen.

Diagramm 23: Verlauf der Fugenöffnung an der Heißseite in halber Steinhe im Knotenpunkt 343 in Abhängigkeit der Isolierungsstärke



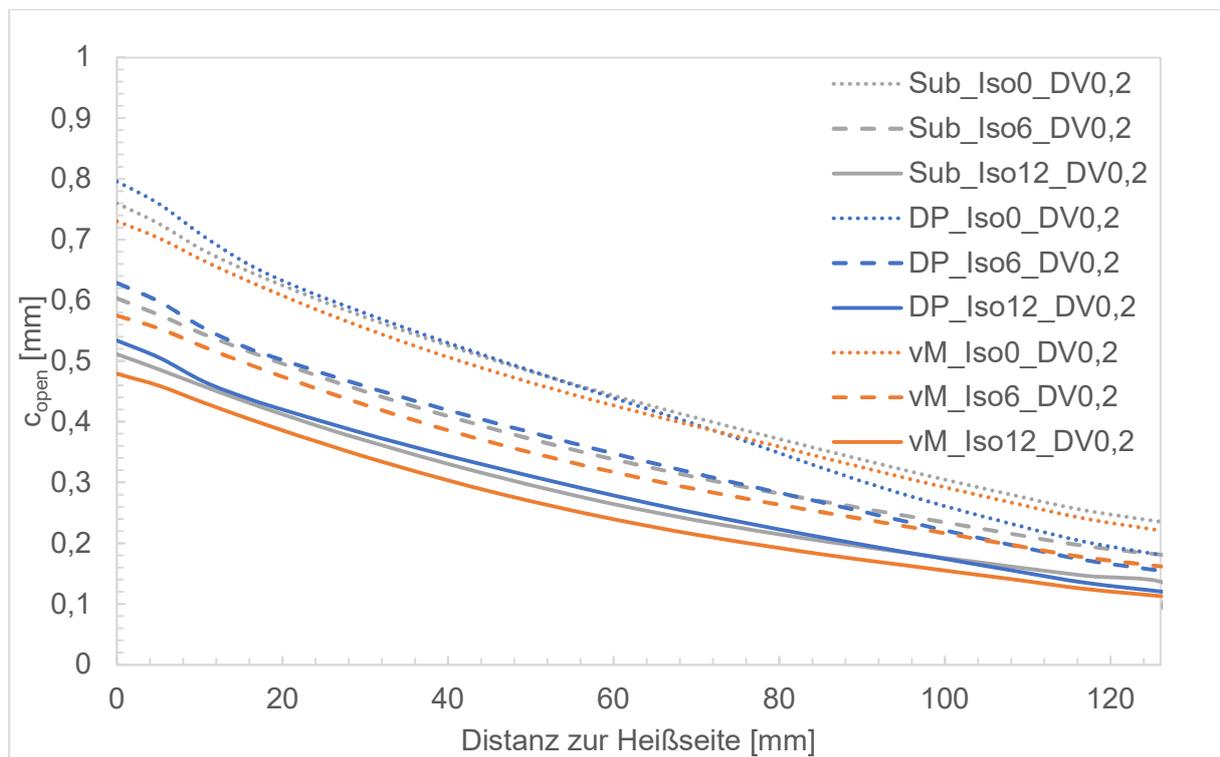
In folgendem Diagramm 24 ist die Fugenöffnung an der Heißseite am Ende des eineinhalbstndigen Abkühlens ($t = 43,63 \text{ h}$), also vor der nächsten Charge, abgebildet. Wie bereits im vorherigen Diagramm 23 ersichtlich, bekommt man die höchsten Werte anhand des DP-Modells. Die niedrigsten Werte der Fugenöffnung erhält man mit dem Kriechmodell. Wie bei der Variation der Dehnvorgabe kann auch hier ein Zusammenhang mit den irreversiblen Verformungen in Diagramm 21 hergestellt werden. Auch diese sind für DP am höchsten und für das Kriechmodell am geringsten. Die Fugenöffnung sinkt mit steigender Dicke der Isolierungsschicht und beträgt zum Zeitpunkt $t = 43,63 \text{ h}$ für das DP-Modell $0,80\text{--}0,53 \text{ mm}$ ($12 \text{ mm}\text{--}0 \text{ mm}$ Isolierung) und beim Kriechmodell $0,73\text{--}0,48 \text{ mm}$. Die MDPC-Subroutine reiht sich mit $0,76\text{--}0,51 \text{ mm}$ dazwischen ein.

Diagramm 24: Fugenöffnung am Ende des Schrittes *Abkühlen 1,5h* an der Heißseite des Verschleißfutters in Abhängigkeit der Isolierungsstärke



Den Verlauf der Fugenöffnung entlang des Verschleißfutters zum Zeitpunkt $t = 43,63h$ (Ende des Schrittes *Abkühlen 1,5h*) zeigt das Diagramm 25. Die Fugenöffnung sinkt mit steigender Isolierungsstärke und von der Heiß- zur Kaltseite, wobei der Einfluss der Isolierung an der Heißseite größer ist als an der Kaltseite. An der Heißseite zeigt das DP-Modell in allen Varianten die höchste Fugenöffnung, das Kriechmodell die geringste. An der Kaltseite hingegen weist die MDPC-Subroutine mit 0,2– 0,14 mm (0– 12 mm Isolierung) die höchsten Werte auf. Die Fugen im DP-Modell betragen 0,18– 0,12 mm. Das Kriechmodell weist eine Fugenöffnung von 0,22– 0,11 mm auf. Bei den Varianten ohne Isolierung (0 mm) ist die Fugenöffnung also beim DP-Modell, bei einer Isolierung von 12 mm beim Kriechmodell am geringsten.

Diagramm 25: Öffnung der Vertikalfuge entlang halber Steinhöhe am Ende des Schrittes *Abkühlen 1,5h*



5 Resümee

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sowohl die Variation der Dehnvorgabe (DV) als auch eine sich verändernde Isolierungsstärke (Iso) eindeutige Einflüsse auf die thermomechanischen Belastungen in der Zustellung der Schlackenzone einer Stahlpfanne haben.

Im Aufheizprozess treten zuerst plastische Verformungen auf. Kriechdehnungen treten erst ab einer gewissen Temperatur auf, überwiegen am Ende des Vorheizens allerdings gegenüber den plastischen Dehnungen. Beim Thermoschock treten plötzliche, große irreversible Verformungen auf, wobei hier die plastischen Dehnungen dominieren. In der Gesamtbetrachtung fallen die plastischen Dehnungen höher aus als die Kriechdehnungen. Während des Vorheizens sind die plastischen Dehnungen, die mit dem Drucker-Prager-Modell simuliert wurden, größer als die Kriechdehnungen. Das hat den simplen Grund, dass für Kriechen die nötigen Temperaturen noch nicht erreicht sind. Das zeigt auch die MDPC-Subroutine, denn hier zeigen sich plastische Dehnungen wesentlich vor den Kriechdehnungen.

Die maximal auftretenden Zugspannungen in Umfangsrichtung im Verschleißfutter (Diagramm 4) werden durch die Dehnvorgabe kaum beeinflusst, das verwendete Materialmodell wirkt sich jedoch maßgeblich auf die Höhe der Maximalwerte aus. Dabei erhält man die höchsten Maximalzugspannungen im Kriechmodell, die geringsten im DP-Modell. Die Maximaldruckspannungen in Umfangsrichtung (Diagramm 5) treten während des Aufheizens auf und werden sowohl vom Materialmodell als auch von der Dehnvorgabe beeinflusst. Mit zunehmender Dehnvorgabe tritt das Druckspannungsmaximum später auf. Im Falle der MDPC-Subroutine und dem Kriechmodell führt eine steigende Dehnvorgabe zu geringeren Maximalwerten. Für das DP-Modell steigt das Druckspannungsmaximum zunächst bei einer Dehnvorgabe von 0,2–0,5 mm, ehe es bei weiterer Erhöhung von 0,5–0,8 mm wieder abfällt und geringere Werte als bei DV = 0,2 mm erreicht. Die durch den Thermoschock verursachten Druckspannungsspitzen erreichen nicht die Höhe jener beim Vorheizen und werden bei allen drei Materialmodellen mit zunehmender Dehnvorgabe kleiner. Beim adiabatischen Kühlen treten keine für den Verschleiß relevanten Spannungen auf.

In Vertikalrichtung treten an der Heißseite die maximalen Zugspannungen (Diagramm 7) im Kriechmodell kurz nach dem Thermoschock auf, für Drucker-Prager und die MDPC-Subroutine wird die Maximalzugspannung am Ende des Vorheizens erreicht. Die Maximalzugspannungen im Kriechmodell fallen dabei am höchsten aus. Die Maximaldruckspannung tritt beim Thermoschock auf und wird mit steigender Dehnvorgabe kleiner. Auch hier erreicht das Kriechmodell die höchsten Werte. Der Druck in Vertikalrichtung während des Vorheizens wird im Kriechmodell und der MDPC-Subroutine mit steigender Dehnvorgabe reduziert. Beim DP-Modell steigt dieser Druck bei einer Dehnvorgabe von 0,2–0,5 mm zunächst an, ehe er bei 0,5–0,8 mm wieder abfällt.

Im Stahlmantel herrschen nahezu konstante Zugspannungen, welche mit steigender Dehnvorgabe kleiner werden (Diagramm 8). Den höchsten Zugspannungsabfall im Stahlmantel erhält man bei einer Erhöhung der Dehnvorgabe von 0,2 auf 0,4 mm. Eine weitere Erhöhung führt nur mehr zu geringen Zugspannungsreduktionen.

Die Maximaldruckspannungen im Verschleißfutter treten in allen Fällen an der Heißseite bzw. heiseitennahe innerhalb der ersten 5 mm des Verschleißfutters auf. Bei geringer Dehnvorgabe steht das Verschleißfutter vollständig unter Druck. Mit steigender Dehnvorgabe kommt es zu Zugspannungen im Verschleißfutter, welche bei größerer Dehnvorgabe höher ausfallen und näher an der Heißseite auftreten. Das DP-Modell erreicht die höchsten Zugspannungen, während man im Kriechmodell die höchsten Werte für Druck erhält. Generell nehmen die Spannungen in der Zustellung mit zunehmendem Abstand zur Heißseite ab.

Irreversible Verformungen werden maßgeblich von der Dehnvorgabe beeinflusst (Diagramm 10). Dabei gilt: Je höher die Dehnvorgabe ist, desto geringer fallen die irreversiblen Verformungen aus. Plastische Dehnungen treten beim Vorheizen früher auf als Kriechdehnungen. Bei großer Dehnvorgabe (0,5–0,8 mm) dominieren letztere in diesem Abschnitt allerdings. Die Höhe der Kriech- und plastischen Dehnungen unterscheidet sich bei einer Dehnvorgabe von 0,2 mm am Ende des Vorheizens kaum. Der Thermoschock führt zu weiteren plötzlichen irreversiblen Verformungen. In diesem Abschnitt sind die plastischen Dehnungen dominant. Die höchsten irreversiblen Verformungen erreicht das DP-Modell, die geringsten das Kriechmodell.

Auf die Fugenöffnung wirkt sich die Dehnvorgabe negativ aus. Während der Charge kommt es zur Fugenöffnung an der Heißeite, die mit steigender Dehnvorgabe höher ausfällt. Auch das Materialmodell spielt in diesem Abschnitt des Simulationsprogrammes eine erhebliche Rolle (Diagramm 12). Während das Kriechmodell kaum eine Öffnung der Fuge (0,03 mm) aufweist, zeigt Drucker-Prager eine Fugenöffnung von 0,1 mm. Am Ende des adiabatischen Kühlens ist der Einfluss der Dehnvorgabe sowie des Materialmodells nur mehr gering (Diagramm 12, Diagramm 13). Die Fugenöffnung fällt mit steigender Dehnvorgabe höher aus und zeigt ihr Maximum an der Heißeite. Mit zunehmendem Abstand zur Heißeite sinkt auch die Öffnung der Vertikalfuge (Diagramm 14).

Der Haupteinfluss der Isolierungsstärke liegt in der Temperaturverteilung im Zustellungsaufbau. Eine hohe Isolierungsstärke führt zu höheren Temperaturunterschieden zwischen Heißeite und Kaltseite und verursacht damit höhere Temperaturgradienten. Durch eine hohe Isolierungsstärke kann der Thermoschock bei der zweiten Charge reduziert werden, da die Heißeitentemperatur am Ende des *Abkühlens 1,5h* höher ist als bei geringer Isolierungsstärke.

Der Einfluss der Isolierungsstärke auf die Spannungen in Umfangsrichtung im Verschleißfutter fällt wesentlich geringer aus als jener des verwendeten Materialmodells. Die Maximalwerte der Zugspannungen fallen am höchsten im Kriechmodell, am geringsten im DP-Modell aus (Diagramm 15). Die höchsten Druckspannungen werden mit dem Kriechmodell erreicht und diese steigen mit zunehmender Isolierungsstärke noch zusätzlich an. Die geringsten Druckspannungen erhält Drucker-Prager und diese Spannungen werden mit steigender Isolierung noch weiter reduziert. Die Höhe der durch den Thermoschock verursachten Druckspannungen fällt geringer aus als jene während des Vorheizens und wird dabei kaum durch die Isolierung beeinflusst (Diagramm 16).

Auch in Vertikalrichtung überwiegt der Einfluss des Materialmodells gegenüber dem der Isolierungsstärke. Das Kriechmodell zeigt die höchsten Maximalwerte der Zugspannungen, die kurz nach dem Thermoschock auftreten. Die geringsten Maximalzugspannungen erreicht Drucker-Prager, die genauso wie jene der MDPC-Subroutine am Ende des Vorheizens auftreten. Die maximalen Druckspannungen aller Materialmodelle werden beim Thermoschock erreicht und fallen bei allen Isolierungsstärken in ähnlicher Höhe aus. Das Kriechmodell liefert dabei die höchsten Werte, die MDPC-Subroutine die geringsten. Die Druckspannungen während des Vorheizens sinken leicht mit steigender Isolierungsstärke und fallen generell geringer aus als beim Thermoschock (Diagramm 17, Diagramm 18).

Die im Stahlmantel herrschenden Zugspannungen werden durch eine steigende Isolierungsstärke stark erhöht (Diagramm 19). Bei einer großen Schichtdicke der Isolierung steht das Verschleißfutter vollständig unter Druck, unabhängig vom verwendeten Materialmodell. Die Höhe des Druckes hingegen wird vom Materialmodell beeinflusst. Den höchsten Druck erfährt das Verschleißfutter im Kriechmodell, beim DP-Modell den geringsten. Wird auf die Isolierung verzichtet (0 mm), kommt es im Verschleißfutter kaltseitennahe und im Dauerfutter bereits ab dem ersten Drittel zu Zugspannungen (Diagramm 20).

Die Isolierung wirkt sich negativ auf die irreversiblen Verformungen aus. Dabei gilt: Je stärker die Isolierung, desto höher die irreversiblen Verformungen (Diagramm 21). Die irreversiblen Verformungen treten mit steigender Isolierung früher auf. Auch bei variierender Isolierungsstärke sind die dominierenden Dehnungen während des Vorheizens die Kriechdehnungen, während beim Thermoschock die plastischen Dehnungen (Drucker-Prager) überwiegen. Während des adiabatischen Abkühlens dominieren wieder die Kriechdehnungen.

Die Isolierungsstärke übt auch einen Einfluss auf die Fugenöffnung aus. Während der ersten Charge kommt es zu einer Fugenöffnung, die umso geringer ausfällt, je höher die Schichtdicke der Isolierung ist. Die Öffnung der Fuge am Ende des adiabatischen Kühlens ist ebenso von der Isolierungsstärke und weniger vom Materialmodell abhängig. Je höher dabei die Isolierungsstärke ist, desto geringer fällt die Öffnung der Vertikalfuge aus (Diagramm 24, Diagramm 25).

Der Einfluss der Dehnvorgabe ist vor allem bei den auftretenden Druckspannungen beim Vorheizen sowie bei den Zugspannungen im Stahlmantel ersichtlich. Auch die irreversiblen Verformungen zeigen eine wesentliche Abhängigkeit von der Dehnvorgabe. Sowohl die genannten Spannungen als auch die irreversiblen Verformungen werden mit steigender Dehnvorgabe reduziert. In Hinblick auf die Fugenöffnung wirkt sich eine zu große Dehnvorgabe vor allem während der ersten Charge negativ aus. Der Einfluss am Ende des adiabatischen Kühlens hingegen ist nur mehr gering.

Die Isolierungsstärke zeigt die größte Auswirkung auf die Temperaturverteilung in der Zustellung. Eine hohe Isolierungsstärke hilft dabei, den Thermoschock bei der zweiten Charge zu reduzieren. Der Einfluss der Isolierung auf die Fugenöffnung fällt höher aus als jener der Dehnvorgabe. Mit zunehmender Isolierungsstärke kann die Fugenöffnung am Ende des adiabatischen Abkühlens reduziert werden. Jedoch hat eine höhere Isolierungsstärke höhere Zugspannungen im Stahlmantel zur Folge. Die irreversiblen Verformungen werden von der Isolierung weniger beeinflusst als von der Dehnvorgabe. Hohe Isolierungsstärken verursachen nur leicht größere Verformungen als geringe Isolierungsstärken.

6 Referenzen

- [1] Ghosh, A. 2000. *Secondary steelmaking. Principles and applications*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [2] Routschka, G. and Wuthnow, H. 2012. *Taschenbuch Feuerfeste Werkstoffe*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen.
- [3] Bareiro, W. G., Sotelino, E. D., and Andrade Silva, F. de. 2021. Numerical modelling of the thermo-mechanical behaviour of refractory concrete lining. *Magazine of Concrete Research* 73, 20, 1048–1059.
- [4] Vesuvius plc. *Vesuvius - Ladle Linings*. <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/en-au/iron-and-steel/continuous-casting/ladle/linings.html>. Accessed 20 April 2022.
- [5] Schacht, C. A., Ed. 2004. *Refractories handbook*. Mechanical engineering series 178. Dekker, New York, NY.
- [6] Saint-Gobain Ceramics. *Steelmaking. Steel Ladle*. <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/refractory-solutions/steelmaking/steel-ladle>. Accessed 19 April 2022.
- [7] Gruber, D. and Harmuth, H. 2014. Thermomechanical Behavior of Steel Ladle Linings and the Influence of Insulations. *Steel research international* 85, 4, 512–518.
- [8] Andreev, K. and Harmuth, H. 2003. FEM simulation of the thermo-mechanical behaviour and failure of refractories—a case study. *Journal of Materials Processing Technology* 143-144, 72–77.
- [9] Damhof, F., Brekelmans, W., and Geers, M. 2011. Predictive FEM simulation of thermal shock damage in the refractory lining of steelmaking installations. *Journal of Materials Processing Technology* 211, 12, 2091–2105.
- [10] Damhof, F., Brekelmans, W., and Geers, M. 2011. Non-local modelling of cyclic thermal shock damage including parameter estimation. *Engineering Fracture Mechanics* 78, 9, 1846–1861.
- [11] 2020. *ABAQUS Documentation*. Dassault systems.
- [12] Samadi, S., Jin, S., Gruber, D., and Harmuth, H. 2022. Thermomechanical finite element modeling of steel ladle containing alumina spinel refractory lining. *Finite Elements in Analysis and Design* 206, 103762.
- [13] Hou, A., Jin, S., Harmuth, H., and Gruber, D. 2018. A Method for Steel Ladle Lining Optimization Applying Thermomechanical Modeling and Taguchi Approaches. *JOM* 70, 11, 2449–2456.
- [14] Gruber, D. and Harmuth, H. 2008. Durability of Brick Lined Steel Ladles from a Mechanical Point of View. *Steel research international* 79, 12, 913–917.
- [15] Nasdala, L. 2015. *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik. Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks*. Springer eBook Collection. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [16] Richard von Mises. 1913. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 581–592.
- [17] Jin, S. 2015. *Investigation of compressive refractory creep*. Dissertation, Montanuniversität Leoben.
- [18] Drucker, D. C. and Prager, W. 1952. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design.
- [19] Jin, S. 2018. *Modification of ABAQUS Drucker-Prager creep model*.
- [20] Andreev, K. and Harmuth, H. Application of finite element modelling to the thermo-mechanical behaviour of refractories. In *Hendriks, Rots (Hg.) 2002 – Finite Elements in Civil Engineering*, 61–67.
- [21] Stueckelschweiger, M., Gruber, D., Jin, S., and Harmuth, H. 2019. Creep testing of carbon containing refractories under reducing conditions. *Ceramics International* 45, 8, 9776–9781.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung einer Stahlpfanne [4].....	3
Abbildung 2: Zustellung einer Stahlpfanne: Schlackenzone (blau), Stahlbadzone (grün), Boden (grün); Aufprallzone ist in diesem Fall nicht extra ausgewiesen [6].....	4
Abbildung 3: Mikrostruktur eines Magnesia-Carbon-Steines [8].....	6
Abbildung 4: Durch Druckspannungen verursachtes Abplatzen an der Heißseite des Verschleißfutters führt zu ebenen Bruchflächen, die in weiterer Folge durch Erosion abgerundet werden und den sichtbaren Vorverschleiß in den Fugen hervorrufen können [9].....	8
Abbildung 5: Temperaturgradienten der vier untersuchten Kombinationen am Ende des Aufheizens bei 1200°C.....	10
Abbildung 6: 3D-Einheitszellenmodell über die gesamte Höhe der Stahlpfanne [12].....	11
Abbildung 7: Aufbau des 2D-Modelles a) ohne Isolierung mit monolithischem Dauerfutter und b) mit Isolierung und Dauerfutter aus geformten Produkten [13].....	13
Abbildung 8: Beiträge und Konfidenzniveaus der jeweiligen Faktoren zu den betrachteten thermomechanischen Größen (SM = Stahlmantel, VF = Verschleißfutter) [13].....	13
Abbildung 9: von Heiß- zur Kaltseite: Verschleißfutter, Dauerfutter, Isolierung, Stahlmantel [14].....	14
Abbildung 10: Drucker-Prager Fließfläche.....	19
Abbildung 11: Graphische Darstellung des Abaqus Drucker-Prager Kriechmodell [11].....	20
Abbildung 12: Grafische Darstellung des modifizierten Drucker-Prager-Kriechmodelles [19].....	21
Abbildung 13: 2D-Standardmodell mit 124 mm Verschleißfutter, 101 mm Dauerfutter, 6 mm Isolierung und 30 mm Stahlmantel (Von Heiß- zur Kaltseite).....	22
Abbildung 14: 3D-Standardmodell; 1 = Verschleißfutter, 2 = Dauerfutter, 3 = Isolierung, 4 = Stahlmantel, 5 = Rigid, 6 = horizontale Symmetrieebene X-Y, 7 = vertikale Symmetrieebene X-Z, 8 = Keilebene.....	23
Abbildung 15: Randbedingungen des Modells: die Pfeile (rot eingekreist) an der Heißseite stellen die Auflast von 0,01 MPa dar, orange Pfeile (blau eingekreist) stehen für eine eingeschränkte Verschiebung, blaue Doppelpfeile (blau eingekreist) stellen eine eingeschränkte Rotation dar.....	24
Abbildung 16: Benennung einiger relevanter Punkte im 3D-Einheitszellenmodell.....	32

Anhang

Tabelle 11: Zusammenfassung der höchsten bzw. niedrigsten Maximalspannungen in Umfangsrichtung y und Vertikalrichtung z (DV = Dehnvorgabe; x = 0mm = Heißseite, x = 124mm = Kaltseite = KS) bei variierender Dehnvorgabe

	Maximale Zugspannung in y-Richtung im Verschleißfutter [MPa]					
	höchste	bei DV	Position	niedrigste	bei DV	Position
DP-Modell	18,1	0,6 mm	HS/ horiz. Randmitte	16,83	0,8 mm	x = 15,54 mm/ vertik. Randbereich
Kriechmodell	35,23	0,6 mm	HS/ Steinmitte	32,35	0,2 mm	HS/ Steinmitte
MDPC-Subroutine	25,63	0,2 mm	HS/ Steinmitte	18,28	0,8 mm	x = 26,88 mm/ horiz. Randbereich
Maximale Druckspannung in y-Richtung im Verschleißfutter [MPa]						
DP-Modell	-80,28	0,5 mm	HS/ vert. Randmitte	-60,54	0,8 mm	HS, Steinmitte
Kriechmodell	-116,3	0,2 mm	HS/ vert. Randmitte	-73,6	0,8 mm	HS/ vert. Randmitte
MDPC-Subroutine	-96,23	0,2 mm	HS/ vert. Randmitte	-48,07	0,6 mm	HS/ vert. Randmitte
Maximale Zugspannungen in z-Richtung im Verschleißfutter [MPa]						
	höchste	bei DV	Position	niedrigste	bei DV	Position
DP-Modell	19,39	0,8 mm	x = 73,57 mm/ Steinmitte	16,25	0,2 mm	x = 52,10 mm/ vertik. Randmitte
Kriechmodell	56,34	0,2 mm	x = 124 mm (KS)/ vertik. Randmitte	35,87	0,8 mm	HS/ vert. Randmitte
MDPC-Subroutine	29,15	0,5 mm	x = 66,14 mm/ vert. Randmitte	24,43	0,2 mm	HS/ vert. Randbereich
Maximale Druckspannungen in z-Richtung im Verschleißfutter [MPa]						
DP-Modell	-65,85	0,8 mm	HS/ Steinmitte	-59,92	0,6 mm	HS/ vert. Randmitte
Kriechmodell	-71,25	0,2 mm	HS/ vert. Randmitte	-56,58	0,8 mm	HS/ vert. Randmitte
MDPC-Subroutine	-42,3	0,8 mm	HS/ Steinmitte	-34,45	0,4 mm	x = 10,17 mm/ vert. Randbereich
Maximale Zugspannungen in y-Richtung im Stahlmantel [MPa]						
	höchste	bei DV	Position	niedrigste	bei DV	Position
DP-Modell	208,3	0,2 mm	HS/ Innenseite Stahlmantel	160,7	0,8 mm	KS/ Außenseite Stahlmantel
Kriechmodell	247,8	0,2 mm	HS/ Innenseite Stahlmantel	154	0,8 mm	KS/ Außenseite Stahlmantel
MDPC-Subroutine	228,7	0,2 mm	HS/ Innenseite Stahlmantel	150,7	0,8 mm	KS/ Außenseite Stahlmantel

Tabelle 12: Zusammenfassung der höchsten bzw. niedrigsten Maximalspannungen in Umfangsrichtung y und Vertikalrichtung z (DV = Dehnvorgabe; x = 0mm = Heißseite, x = 124mm = Kaltseite = KS) bei variierender Isolierungsstärke

	Maximale Zugspannungen in y-Richtung im Verschleißfutter [MPa]					
	höchste	bei Iso	Position	niedrigste	bei Iso	Position
DP-Modell	17,87	12 mm	HS/ horiz. Randbereich	17,77	0 mm	HS/ horiz. Randbereich
Kriechmodell	36,52	0 mm	HS/ Steinmitte	30,32	12 mm	HS/ Steinmitte
MDPC-Subroutine	26,99	3 mm	HS/ Steinmitte	23,41	12 mm	HS/ Steinmitte
Maximale Druckspannungen in y-Richtung im Verschleißfutter [MPa]						
DP-Modell	-71,87	0 mm	HS/ vert. Randmitte	-65,36	12 mm	HS/ vert. Randmitte
Kriechmodell	-36,52	0 mm	HS/ vert. Randmitte	-30,32	12 mm	HS/ vert. Randmitte
MDPC-Subroutine	-26,99	3 mm	HS/ vert. Randmitte	-23,41	12 mm	HS/ vert. Randmitte
Maximale Zugspannungen in z-Richtung im Verschleißfutter [MPa]						
	höchste	bei Iso	Position	niedrigste	bei Iso	Position
DP-Modell	17,02	3 mm	x = 26,88 mm/ Steinmitte	16,10	9 mm	x = 124 mm (KS)/ vert. Randmitte
Kriechmodell	60,38	12 mm	x = 124 mm (KS)/ vert.	49,45	0 mm	x = 124 mm (KS)/ vert. Randmitte
MDPC-Subroutine	24,79	3 mm	HS/ horiz. Randbereich	22,21	12 mm	x = 39,03 mm/ vert. Randbereich
Maximale Druckspannungen in z-Richtung im Verschleißfutter [MPa]						
DP-Modell	-62,28	6 mm	HS/ vert. Randmitte	-56,65	9 mm	HS/ Steinmitte
Kriechmodell	-72,04	9 mm	HS/ vert. Randmitte	-69,06	0 mm	HS/ vert. Randmitte
MDPC-Subroutine	-39,49	3 mm	HS/ vert. Randmitte	-35,76	12 mm	HS/ vert. Randmitte
Maximale Zugspannungen in y-Richtung im Stahlmantel [MPa]						
	höchste	bei Iso	Position	niedrigste	bei Iso	Position
DP-Modell	245,4	12 mm	HS/ Innenseite Stahlmantel	102,7	0 mm	KS/ Außenseite Stahlmantel
Kriechmodell	305,8	12 mm	HS/ Innenseite Stahlmantel	122,7	0 mm	HS/ Innenseite Stahlmantel
MDPC-Subroutine	279,2	12 mm	HS/ Innenseite Stahlmantel	110,9	0 mm	KS/ Außenseite Stahlmantel